A. CAMPA

# TECHNOLOGIE professionnelle générale pour les MÉCANICIENS

TOME I

FOUCHER - PARIS

A. CAMPA
*Ingénieur A. et M. et E. S. E.*
*Inspecteur général de l'Enseignement technique*

# TECHNOLOGIE
## *professionnelle générale pour les*
# MÉCANICIENS

**TOME I**

**CLASSE DE 2^e^**
**Préparation au Brevet de Technicien et au Baccalauréat technique**

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli, Paris

# FOUCHER

## Collection « LA TECHNIQUE DU MÉTIER »

**Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens.**
Tome I .......... A. CAMPA
Tome II .......... —
Tome III. Procédés d'usinage .......... CAMPA & ROLLET

**L'automobile — Technologie professionnelle générale.**
Tome I. — Les moteurs à quatre temps et à deux temps. M. DESBOIS,
Tome II. — Les organes de transmission et d'utilisation .. F. TOUACHE, R. TORRI & A. TOURANCHEAU
Tome III. — Le moteur Diesel .......... ARMAO & VIEUX

**Technique de la réparation automobile (3 volumes)** .. M. DESBOIS, L. MARIÉ & J.-P. MARTIN

**Technologie professionnelle pratique.**
pour l'ajusteur (3 volumes) .......... A. HOFFMAN & R. LEMOINE
pour le tourneur (3 volumes) .......... L. GOUPIL
pour le chaudronnier (3 volumes) .......... C. LOBJOIS
pour le fraiseur .......... A. ROLLET & A. ARNAUD

**Technologie d'électricité (7 volumes).** P. HEINY et collaborateurs

## Collection « LA TECHNIQUE GRAPHIQUE »

**Schémas d'électricité** .......... P. HEINY

**Mémento de dessin industriel** .......... G. LENORMAND & J. TINEL
Documentation dimensionnelle. Conventions de représentation. Problèmes graphiques.

## Collection « LA TECHNIQUE DU BATIMENT »

Technologie professionnelle de construction : **Maçonnerie** ... A. MEUNIER
Technologie professionnelle de chantier : **Béton armé** ...... —
Technologie professionnelle de construction : **Maçonnerie** .. & LYSENSOONE

*Le livre au service du métier*



*Toute représentation, traduction, adaptation ou reproduction, même partielle, par tous procédés, en tous pays, faite sans autorisation préalable, est illicite et exposerait le contrevenant à des poursuites judiciaires.* (Réf. Loi du 11 mars 1957.)

© Les Éditions FOUCHER, Paris, 1971.

# AVANT-PROPOS

*La technologie professionnelle générale est une discipline essentielle pour les élèves de nos Écoles techniques. Elle rend possible et facile l'explication des travaux d'atelier et permet à la technologie de spécialité de s'orienter vers l'étude raisonnée des méthodes d'usinage.*

*Le livre de technologie générale apporte au maître une aide précieuse, car il le dispense de tout dire en classe. Il n'a pas la prétention de lui tracer, dans le détail, le canevas de sa leçon. L'auteur de cet ouvrage est trop respectueux de la personnalité des professeurs pour oser leur imposer, jusque dans le détail de leur métier, ses propres conceptions pédagogiques. Il sait que chaque maître est persuadé qu'il importe avant tout, en prenant pour thème l'étude des techniques de production, de donner à nos élèves toutes les qualités intellectuelles indispensables à l'accomplissement de leur futur métier.*

*L'homme est de plus en plus engagé dans l'Entreprise moderne car, à tous les échelons de la hiérarchie, elle lui réserve, dans un champ d'activité parfaitement délimité, l'occasion de s'informer par l'observation, de faire preuve de jugement en plaçant les faits extérieurs à l'intérieur du problème à résoudre, de compléter les actes réflexes par des décisions conscientes qui font surtout appel à l'imagination, de conduire l'action et de contrôler sa propre activité ainsi que celle de tous ceux qui sont chargés de l'exécution des décisions prises.*

*L'homme cesse, de plus en plus, d'être employé dans le cycle de la production pour accomplir un travail pouvant être exécuté par une machine ; il reste indispensable à l'industrie parce que seul, il est capable d'ajouter à l'observation, la critique et l'explication, il est susceptible d'analyser les phénomènes pour mettre en évidence les fonctions assurées et apte à découvrir des solutions nouvelles, grâce à ses possibilités de réaliser des synthèses.*

*Appelé à la tête d'une équipe de travail, il remplit à la fois les fonctions* d'organisateur *des activités de ses collaborateurs,* d'éducateur *pour les instruire et obtenir d'eux une action raisonnée,* d'animateur *afin d'introduire, dans l'acte de travail, volontariat et enthousiasme.*

*Pour préparer l'adolescent à la vie, il importe que l'École s'efforce de le rendre capable d'acquérir seul, lorsqu'il en aura besoin, les connaissances indispensables. Elle doit obtenir du jeune une prise de conscience des valeurs spirituelles et développer en lui des mécanismes intellectuels : aptitude à l'observation, à l'analyse, à la synthèse, à l'imagination, à la recherche des analogies et des généralisations, développement de la mémoire et sûreté du jugement.*

*Les disciplines techniques et plus particulièrement la technologie, correctement enseignées, ont autant de vertus que les disciplines traditionnelles.*

*L'enseignement de la technologie ne peut s'accommoder des méthodes dogmatiques qui conduisent à l'indifférence intellectuelle de l'élève pour la matière étudiée et pour l'action pédagogique du maître. Il doit, au contraire, être fondé sur les règles bien connues : « de l'enfant à l'adulte », « du connu à l'inconnu », « du concret à l'abstrait ». La description doit s'effacer devant l'analyse fonctionnelle qui conduit à découvrir les démarches intellectuelles du créateur et ouvre des horizons nouveaux dans le domaine de l'invention.*

*A la classe passive doivent être substituées la classe vivante, qui assure au maître la collaboration intellectuelle des élèves, et la classe active, qui fait appel à leurs intérêts spontanés.*

*Ainsi apparaît la nécessité d'une expérimentation faite en classe par le maître, ou à l'atelier par les élèves, non seulement pour permettre l'effort intellectuel qui conduira du concret vers l'abstrait, mais surtout pour faire prendre conscience au jeune de la complexité du réel technique et l'habituer à une certaine audace professionnelle.*

*L'ouvrage de technologie que nous avons écrit pour les élèves des classes de troisième des Lycées techniques préparant en 3 ans au Brevet d'Agent technique ou des classes de 2e des Lycées techniques préparant en 3 ans au Brevet de technicien, et qui est conforme aux programmes en vigueur actuellement, fait souvent mention de matériel expérimental à utiliser.*

*Quelques leçons, notamment celles relatives à l'outil de coupe, sont impossibles à faire sans matériel expérimental ; elles peuvent être rapidement comprises si elles sont préparées par une étude graphique dirigée par le professeur de dessin, réalisées avec du matériel abondant et bien adapté, complétées par des exercices à l'atelier sur machines à affûter.*

*Nous avons adopté les unités du système international (ancien M. K. S. A.) et remplacé notamment le kilogramme-force par le newton.*

*Les contraintes ou résistances à la rupture ont été exprimées en newtons par millimètre carré et non en mégapascals, afin de rendre plus facile, dans l'esprit du lecteur, la conversion en kgf/mm².*

*Nous remercions les professeurs et les élèves qui nous ont encouragé à rédiger cet ouvrage, et plus particulièrement notre ancien élève M. Vinckel, professeur de Collège technique, qui a, au cours de la Semaine pédagogique de Cachan en 1957, présenté une étude remarquable de l'outil de coupe et de son affûtage.*

*Nous espérons que cet ouvrage trouvera un accueil favorable auprès des collègues chargés de l'enseignement de la Technologie, et qu'il rendra service aux élèves qui l'utiliseront.*

A. CAMPA.

# ÉTUDE
# DES DIVERS PROCÉDÉS D'OBTENTION
# DES PIÈCES MÉTALLIQUES

# TABLEAU DES PRINCIPALES UNITÉS

| PRINCIPALES GRANDEURS | SYSTÈME M K S A<br>Unités fondamentales<br>*Longueur* : 1 mètre<br>*Masse* : 1 kilogramme<br>*Temps* : 1 seconde<br>*Intensité électrique* :<br>1 ampère | SYSTÈME M Kp S<br>Unités fondamentales<br>*Longueur* : 1 mètre<br>*Force* :<br>1 kilogramme-force<br>*Temps* : 1 seconde | RELATIONS ENTRE LES UNITÉS |
|---|---|---|---|
| **Masse** | **1 kilogramme : 1 kg** | **1 unité de masse m kp s** | **1 kg = $\frac{\text{1 um m kp s}}{9,8}$** |
| **Force** | **1 newton : 1 N** | **1 kilogramme-force :<br>1 kgf** | **1 kgf = 9,8 N**<br>**1 N $\simeq$ $\frac{\text{1 kgf}}{10}$** |
| **Pression** | **1 pascal : 1 P**<br>**1 P = $\frac{\text{1 N}}{\text{1 m}^2}$**<br>**1 mégapascal : 1 MP** | **1 kilogramme-force<br>par m² : 1 kgf/m²**<br>**1 kilogramme-force<br>par cm² : 1 kgf/cm²** | **1 kgf/m² $\simeq$ 10 P**<br>**1 MP = $10^6$ P**<br>**1 MP = 1 N/mm²**<br>**1 hpz = 1 hectopièze**<br>**1 hpz = 1 kgf/cm²** |
| **Contrainte ou résistance** | **1 newton par mm² :<br>1 N/mm²** | **1 kilogramme-force<br>par mm² : 1 kgf/mm²** | **1 kgf/mm² $\simeq$ 10 N/mm²** |
| **Travail** | **1 joule : 1 J**<br>**1 kilojoule : 1 kJ = $10^3$ J** | **1 kilogrammètre : 1 kgm** | **1 kgm = 9,8 J $\simeq$ 10 J**<br>**1 kJ = 102 kgm** |
| **Puissance** | **1 watt : 1 W**<br>**1 kilowatt :<br>1 kW = $10^3$W** | **1 kilogrammètre<br>par seconde : 1 kgm/s**<br>**1 cheval-vapeur : 1 ch** | **1 kgm/s = 9,8 W**<br>**1 ch = 75 kgm/s**<br>**1 ch = 736 W** |

# La fonderie

La fonderie est un procédé de fabrication qui permet de réaliser des pièces par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou dans un moule métallique.

On peut ainsi obtenir, avec rapidité et économie, des pièces de formes compliquées en fonte, en acier, en alliages de cuivre, d'aluminium, de magnésium, de zinc, d'étain et de plomb.

Les pièces moulées ne peuvent être généralement utilisées sans avoir subi un opération d'usinage à l'outil ou à la meule.

## PRINCIPE DU MOULAGE EN SABLE

A l'intérieur d'un bloc de sable, convenablement serré, on réalise une cavité ayant la forme de la pièce désirée. Le métal en fusion est introduit par un orifice (trou de coulée) prévu à cet effet. Après refroidissement, le bloc métallique constitue la pièce que l'on voulait fabriquer.

### A. — Le modèle

Pour obtenir économiquement la cavité dans laquelle le métal est coulé, on utilise un modèle, le plus souvent en bois, qui a la forme et les dimensions de l'objet désiré, aux différences suivantes près :

a) Les dimensions du modèle sont légèrement plus grandes que celles de la pièce à obtenir pour tenir compte de la contraction du métal au cours du refroidissement (*phénomène du retrait*). Cette augmentation des cotes atteint 1 % pour les pièces en fonte, 1,5 % pour les pièces en acier et 2 % pour les pièces en alliage d'aluminium.

b) Les parties cylindriques de la pièce sont exécutées légèrement coniques sur le modèle ; on peut ainsi facilement le retirer du moule sans arracher des particules de sable. On dit qu'on a donné de la dépouille au modèle ; sa position dans le moule détermine l'emplacement de cette dépouille.

c) Si la pièce à réaliser doit être usinée, on augmente les dimensions du modèle de 2 ou 3 mm de façon à réserver une surépaisseur d'usinage.

Supposons que l'on ait à fabriquer une pièce cylindrique en fonte de 94 mm de diamètre et de 47 mm de hauteur, pièce à usiner ensuite sur la partie cylindrique et sur l'une des extrémités, l'autre base restant brute de fonderie. La pièce brute à obtenir aura donc, si l'on prévoit une surépaisseur d'usinage de 3 mm, les dimensions suivantes :

$$\Phi = 94 + (2 \times 3) = 100 \text{ mm} ; e = 47 + 3 = 50 \text{ mm.}$$

*Dimensions du modèle.* — Diamètre : $100 \times \frac{101}{100} = 101$ mm ;

épaisseur : $50 \times \frac{101}{100} = 50{,}5$ mm.

Pour éviter le calcul des cotes, l'ouvrier qui fabrique les modèles (le modeleur) utilise un mètre au retrait : pour la fonte, celui-ci mesure 101 cm, longueur divisée en 100 parties égales.

*Dépouille.*

La pièce étant coulée horizontalement, on lui donne une forme tronconique, l'angle de dépouille α valant 2 ou 3° (voir *fig.* 1).

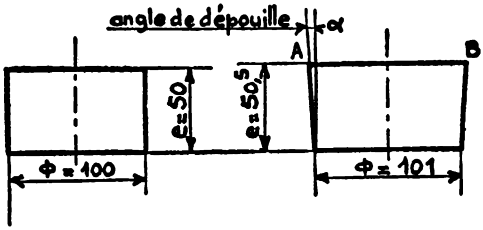



*Fig.* 1. — Pièce et modèle correspondant.

## B. — Le matériel

Pour l'exécution du moule, on emploie un châssis à l'intérieur duquel on peut serrer le sable.

Les châssis de fonderie se font en 2, 3 ou plusieurs parties.

Un cadre en fonte ou en acier soudé constitue chaque partie du châssis. L'intérieur du cadre présente des nervures pour retenir le bloc de sable. Les châssis sont assemblés par des goujons (en général trois), fixés sur les oreilles de l'une des parties, et enfoncés avec un léger jeu dans les oreilles correspondantes de l'autre (voir *fig.* 2).

Des poignées permettent la manœuvre des châssis.

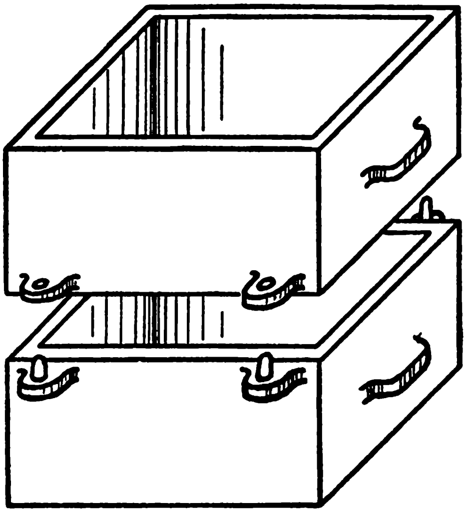


*Fig.* 2. — Châssis de fonderie.

Les outils utilisés par le mouleur comprennent :

**Pour la serre du sable** : la pilette et le fouloir (*fig.* 2 *bis*).

**Pour l'exécution des joints** : la truelle et la spatule, petit outil affectant la forme d'une cuiller à café allongée.

**Pour la réparation du moule** : des crochets et lissoirs divers.

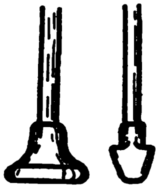


*Fig.* 2 *bis*. — Pilette et fouloir.

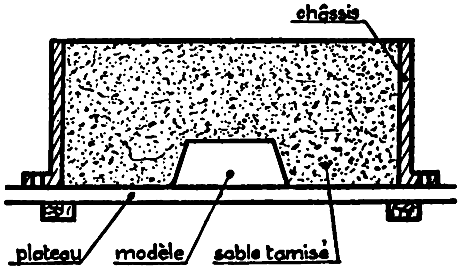



*Fig.* 3. — Exécution du dessous de châssis.

## C. — Le sable

Le sable est un mélange :

— **de silice**, pratiquement infusible au contact du métal en fusion ;

— **d'argile** qui sert de liant entre les grains de silice et permet au moule de conserver la forme donnée par le modèle ;

— **de noir végétal** dont la combustion assure au moule la porosité nécessaire à l'évacuation des gaz chassés par l'arrivée dans le moule du métal en fusion (air et vapeur d'eau).

## D. — Exécution d'un moule

Les différentes phases de l'exécution du moule employé pour fabriquer la pièce représentée par la *figure* 1 peuvent être résumées ainsi :

**Première opération.** ***Exécution du dessous de châssis*** **(fig. 3).**

*a*) poser le modèle sur un plateau ou une tôle bien plane, à l'intérieur du châssis de dessous ;

*b*) tamiser du sable de moulage qui recouvrira le modèle de quelques centimètres et remplira le châssis ;

*c*) serrer à l'aide du fouloir et de la pilette, racler l'excédent de sable. Le sable doit être serré modérément pour permettre l'évacuation des gaz ;

*d*) retourner le châssis.

**Deuxième opération.** ***Exécution du dessus de châssis*** **(fig. 4).**

*a*) lisser le joint et saupoudrer de sable blanc sec pour éviter le collage des deux parties du moule ;

*b*) placer la deuxième partie de châssis sur la première et repérer les châssis ;

*c*) tamiser du sable de moulage jusqu'à une hauteur de quelques centimètres, placer le mandrin de coulée et achever le remplissage du châssis ;

*d*) serrer ;

*e*) piquer des trous d'air à l'aide de l'aiguille (sorte de pointe à tracer avec poignée).

Ces trous d'air ont pour effet d'augmenter la porosité du moule.

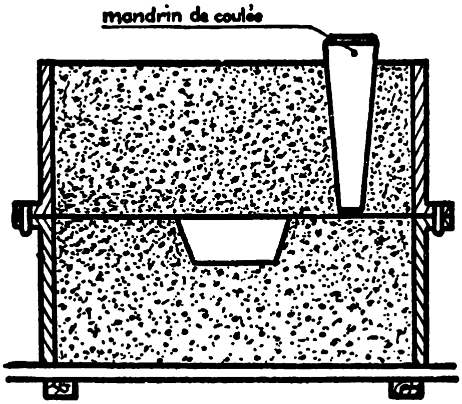



*Fig. 4.* — **Exécution du dessus de châssis.**

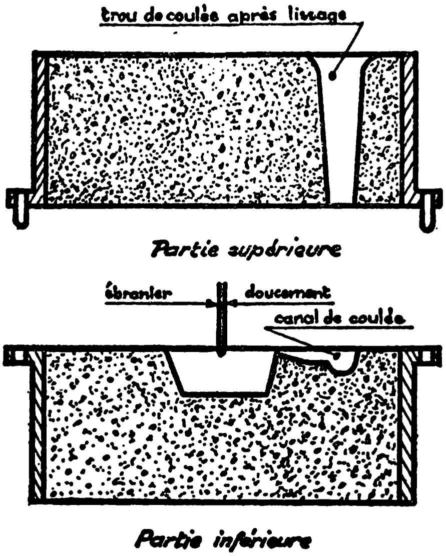



*Fig. 5.* — **Démoulage.**

**Troisième opération.** ***Démoulage*** **(fig. 5).**

*a*) enlever le mandrin de coulée ;

*b*) séparer les deux parties de châssis ;

*c*) enlever le modèle en ébranlant le moins possible (utilité de la dépouille) ;

*d*) exécuter le canal de coulée, lisser, souffler, pour enlever les grains de sable ;

*e*) saupoudrer de noir végétal ;
Cette couche de noir végétal permet d'obtenir une pièce parfaitement lisse.

**Quatrième opération.** ***Remoulage*** **(fig. 6).**

*a*) mettre en place les deux parties de châssis en vérifiant la position des repères ;

*b*) préparer un lit de sable sur le sol et y déposer doucement le moule ;

*c*) charger le moule ou claveter pour éviter que le châssis supérieur ne se soulève sous la poussée du métal en fusion.

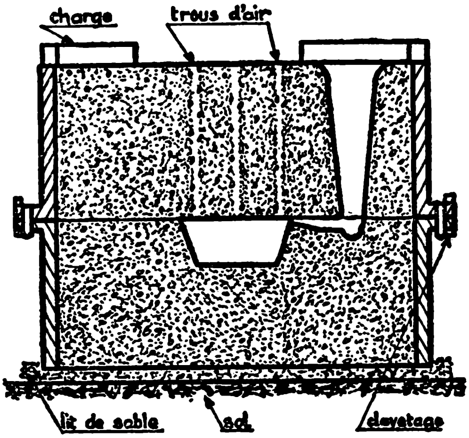



*Fig.* 6. — Remoulage.

**Cinquième opération.** ***Coulée.***

Le métal en fusion est versé dans le moule par le trou de coulée. L'air contenu dans la cavité réservée à la pièce et la vapeur d'eau provenant de l'humidité du moule s'échappent par les pores du sable et par les trous d'air.

Remarque.

La surface de contact des deux parties du moule est appelée *face de joint*. Elle peut être plane ou tourmentée suivant la forme du modèle.

La ligne de contact de cette face avec le modèle est appelée *ligne de joint*.

Dans l'exemple choisi, la ligne de joint est la circonférence AB (voir *fig.* 1).

## PRINCIPALES MÉTHODES D'EXÉCUTION DES MOULES

Cette étude porte sur l'exécution :

a) **Des pièces qui présentent une ligne de joint gauche ;**

b) **Des moules avec chape ;**

c) **Des moules avec trousseau circulaire ou rectiligne ;**

d) **Des pièces qui nécessitent l'emploi de noyaux ;**

e) **Des pièces qui obligent à exécuter des mottes battues ;**

f) **Des pièces qui doivent être exécutées en série avec utilisation soit de couches en plâtre et de plaques modèles, soit de machines à mouler.**

## A. — Exécution des pièces avec ligne de joint gauche

**Ce cas se rencontre lorsque la pièce ne présente pas un plan de symétrie ou une surface d'appui plane d'assez grande étendue (*fig.* 7).**

**Les *figures* 8, 9, 10 représentent les différentes phases du moulage.**

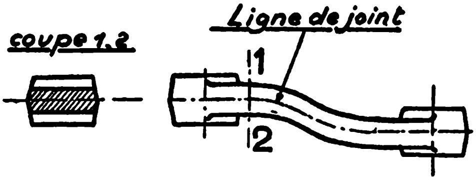



***Fig.* 7. — Dessin de la pièce à mouler.**

L'opération comporte :

a) **L'exécution d'une fausse partie avec encastrement d'une partie de la pièce dans le sable ;**

b) **Le serrage du châssis de dessous A (*fig.* 8) ;**

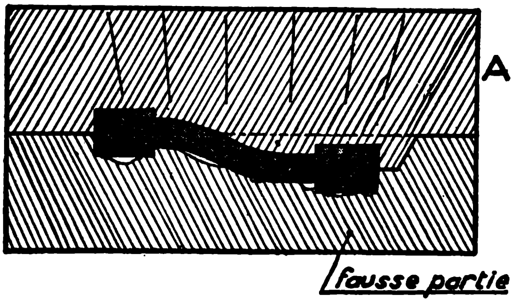



***Fig.* 8. — Exécution du châssis de dessous A.**

c) **Le serrage sur le châssis A du châssis de dessus B (*fig.* 9). Remarquer que l'on a prévu un *évent* au droit de la partie massive supérieure pour l'évacuation des gaz et aussi pour la constitution d'une *réserve de métal liquide.***

**Au moment du refroidissement, ce métal alimente la pièce, à la surface de laquelle toute *dépression* se trouve ainsi évitée.**

d) **La finition du moule : taillage de la *saignée de coulée*, préparation du *trou de coulée*, *mise du noir* de fonderie et *lissage* (*fig.* 10).**

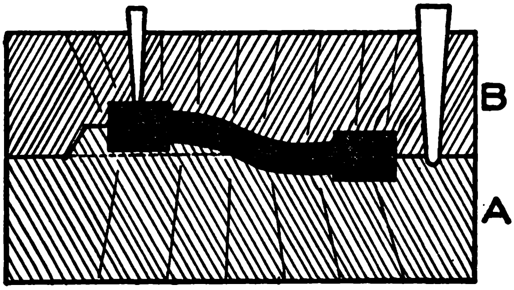



***Fig.* 9. — Exécution du châssis de dessus B.**

## B. — Moulage en chape

Chaque fois que, dans sa position de moulage, une pièce présente aux extrémités des dimensions plus grandes qu'au milieu, on utilise le *moulage en chape*, afin de pouvoir retirer le modèle obligatoirement constitué en deux ou plusieurs parties.

On appelle *chape* le châssis intermédiaire qui peut être formé par plusieurs châssis boulonnés.

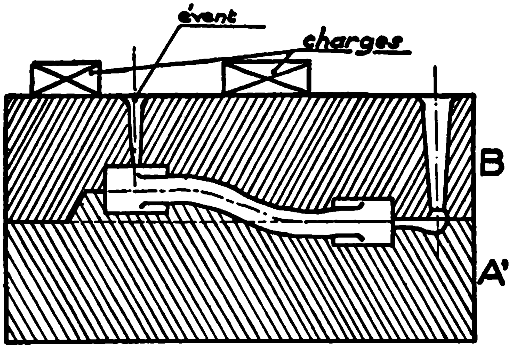



*Fig.* 10. — Finition du moule et remoulage.

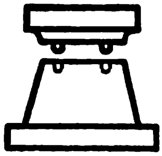


*Fig.* 11. — Modèle.

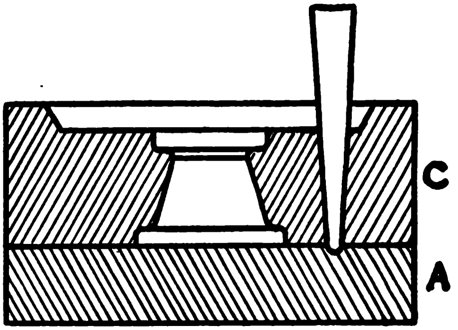



*Fig.* 12. — Exécution de la chape C.

La *figure* 11 représente le modèle en deux parties, la ligne de séparation étant choisie de façon que chacune des parties ne présente pas de surface en *contre-dépouille*.

La suite des opérations comprend :

a) **Serrage du châssis de dessous A.**
Il n'y a pas lieu de faire ici une fausse partie, car on a supposé la surface de base plane.

b) **Serrage de la chape C** (*fig.* 12).

c) **Serrage de la partie de dessus B** (*fig.* 13).

d) **Enlèvement du modèle** (*fig.* 14 et 15).

e) **Finition du moule** (*fig.* 16).

Remarquons une *coulée à talon* en *a*, une *coulée de réchauffage* en *b*, et enfin un *évent à talon* en *c*, car le moule est massif et haut.

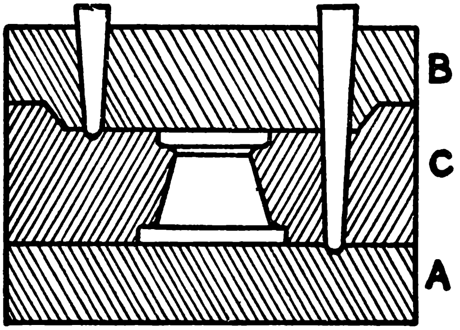



*Fig.* 13. — Exécution du châssis de dessus B.

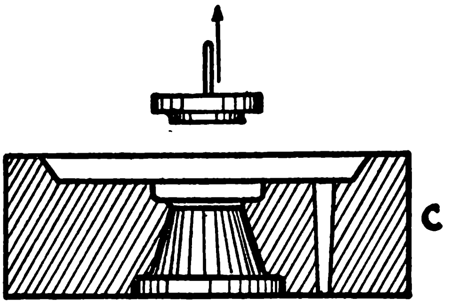



*Fig.* 14. — Enlèvement de la partie supérieure du modèle.

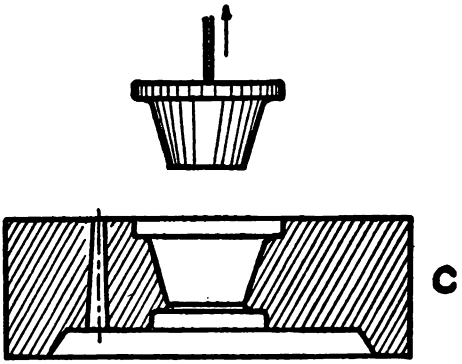



*Fig.* 15. — Enlèvement de la partie inférieure du modèle.

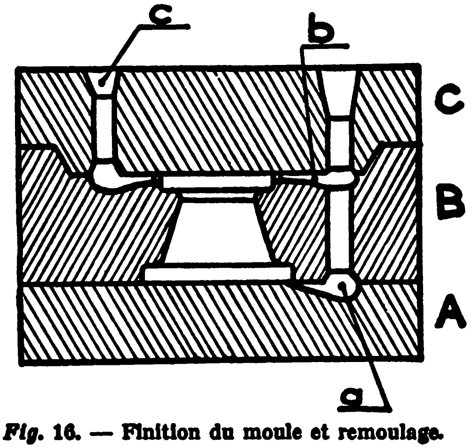



*Fig.* 16. — Finition du moule et remoulage.

## C. — Moulage au trousseau

Le *moulage au trousseau* permet d'obtenir, *sans réaliser de modèle,* des moules de pièces circulaires, ovales, elliptiques, à forme hélicoïdale ou à profil constant.

Pour l'exécution des pièces séparées, il évite donc les frais du prix de revient

souvent onéreux d'un modèle. Il ne s'applique utilement que dans la fabrication des pièces de moyennes ou de grandes dimensions.

## 1° Moulage au trousseau circulaire.

L'outillage comprend un arbre vertical, supporté par une crapaudine. L'arbre reçoit un support pouvant tourner et glisser à frottement doux. Sur ce support, on fixe la *planche à trousser*, taillée au profil extérieur ou intérieur des pièces à mouler.

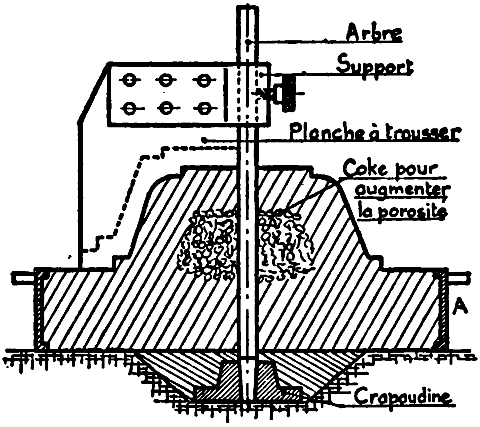



*Fig.* 18. — Troussage du châssis de dessous au profil extérieur.

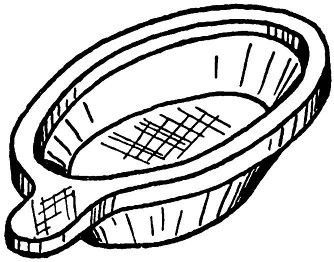


*Fig.* 17. — Dessin de la pièce à exécuter.

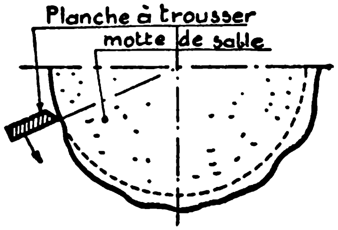



*Fig.* 19. — Action de la planche à trousser.

Supposons que l'on désire obtenir une sorte de cuve comportant une oreille (*fig.* 17). La *cuve* proprement dite est un solide de révolution qu'on peut obtenir par troussage ; et l'on prévoit un petit modèle pour exécuter l'*oreille.* Voici la suite des opérations :

*a*) mettre en place la crapaudine et l'arbre ;

*b*) serrer du sable sur le châssis A en prévoyant une motte de sable de dimensions supérieures à celles de la cuve ;

*c*) monter le support équipé avec une planche taillée au profil de la génératrice extérieure de la pièce ;

*d*) faire tourner la planche autour de l'arbre et, en même temps, la descendre jusqu'à ce que l'on ait obtenu une motte aux dimensions extérieures de la cuve (*fig.* 18 et 19) ;

*e*) enlever le support, mettre en place le modèle de l'oreille, puis serrer les châssis B et C solidaires qui vont constituer le dessus du moule (*fig.* 20) ;

*f*) retirer les châssis B et C et monter, avec le support, la planche à trousser sur laquelle on a fixé une plaque d'acier découpée au profil intérieur de la cuve, puis trousser la partie A pour lui donner la forme du creux de la cuve (*fig.* 21) ;

*g*) terminer le moule après avoir enlevé l'arbre et bouché son trou de passage à travers les différentes parties du moule (*fig.* 22).

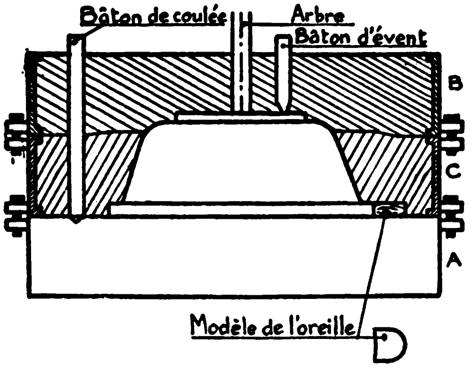



*Fig.* 20. — Exécution du châssis de dessus.

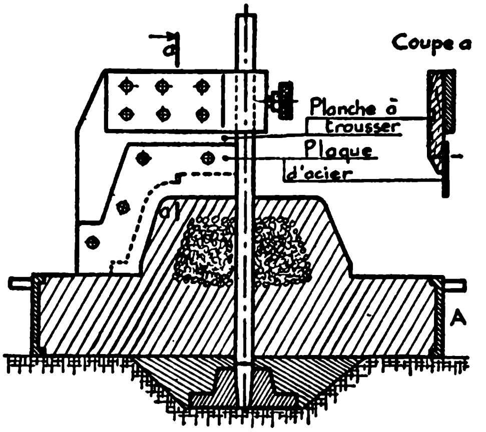



*Fig.* 21. — Troussage du châssis de dessous au profil intérieur.

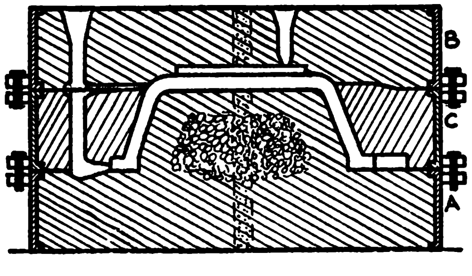



*Fig.* 22. — Finition du moule et remoulage.

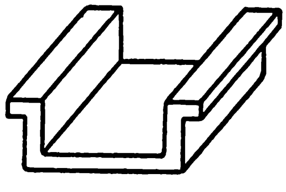


*Fig.* 23. — Pièce à exécuter.

## 2° Moulage au trousseau rectiligne.

On peut également, en utilisant une planche à trousser, exécuter des moules pour des pièces à profil constant dont la génératrice n'est pas circulaire. Soit, par exemple, à exécuter le moule de la pièce représentée par la *figure* 23, dont les génératrices sont rectilignes.

Les *figures* 24, 25, 26 et 27 indiquent les différentes phases d'exécution.

*a*) On serre le châssis A et on place sur la surface de joint deux planches *a* et *b* matérialisant les génératrices de la pièce.

Ces planches sont disposées à l'écartement voulu et maintenues par de grands clous enfoncés dans le sable.

*b*) Avec une planche à trousser, découpée au profil intérieur de la pièce, on creuse dans le sable une rainure dont la longueur est celle de cette pièce (*fig.* 24).

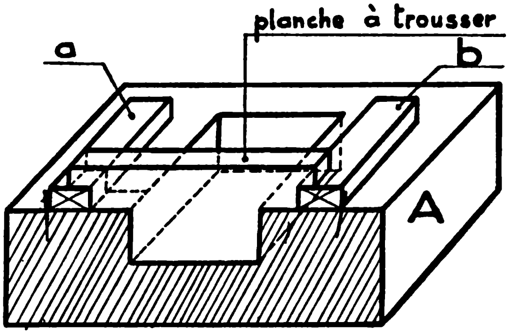



*Fig.* 24. — **Troussage du châssis de dessous au profil intérieur.**

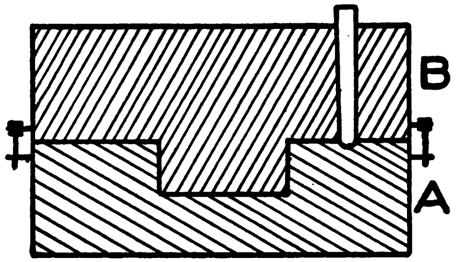



*Fig.* 25. — **Exécution du châssis de dessus.**

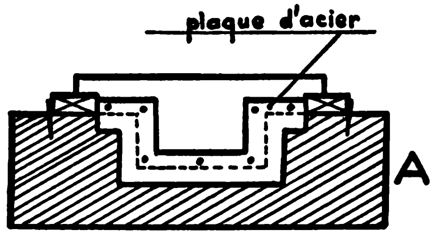



*Fig.* 26. — **Troussage du châssis de dessous au profil extérieur.**

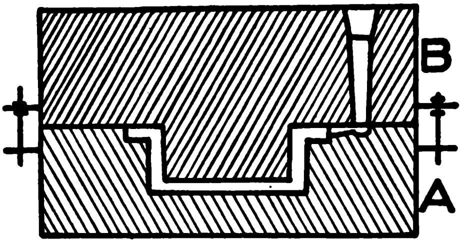



*Fig.* 27. — **Finition du moule et remoulage.**

c) Sur le châssis A, ainsi préparé, on serre le châssis de dessus B (*fig.* 25).

*d*) On monte sur la planche à trousser une plaque d'acier découpée au profil extérieur de la pièce, ou l'on prend une autre planche préparée à cette forme.

On remet en place, à l'écartement convenable, les tasseaux *a* et *b* de guidage et, avec la planche à trousser, on modifie la section de l'empreinte pour lui donner la forme de l'extérieur de la pièce (*fig.* 26).

*e*) On termine le moule (*fig.* 27).

REMARQUE.

On aurait pu, en donnant aux planches *a* et *b* une forme curviligne, exécuter le moule d'une pièce qui aurait eu des génératrices courbes planes (cercle, ellipse, ovale, etc.) ou gauches (hélice).

## D. — Exécution de moules avec noyaux

### 1° Généralités.

Certaines pièces présentent des parties qu'il est difficile d'obtenir par moulage ordinaire : parties intérieures avec contre-dépouille, minces épaisseurs qui rendraient le modèle trop fragile.

Dans ce cas, on exécute par moulage l'empreinte extérieure de la pièce et on complète le moule en ajoutant des masses de sable, appelées *noyaux*, préparées à l'avance dans des boîtes en bois ou en acier (boîtes à noyaux). Les noyaux prennent contact avec le moule au moyen de portées qui ont pour but :

a) *de repérer le noyau en position dans le moule,*

b) *de supporter le noyau.*

La *figure* 28 représente un moule terminé, avec noyau reposant sur la partie inférieure du moule.

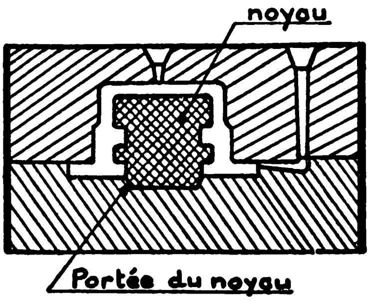



*Fig.* 28. — Moule terminé.

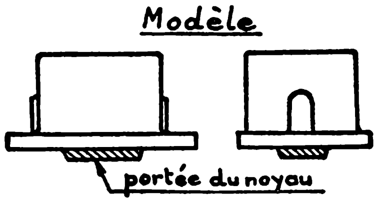



*Fig.* 29. — Modèle.

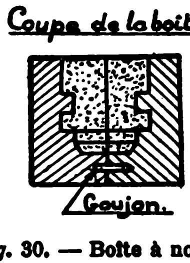



*Fig.* 30. — Boîte à noyau.

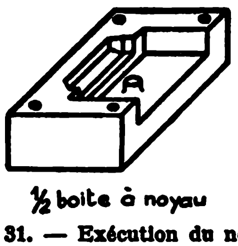



*Fig.* 31. — Exécution du noyau.

Les *figures* 29, 30 et 31 donnent le détail d'exécution du modèle et de la boîte à noyau. On remarquera que le modèle donne la forme de l'extérieur de la pièce tandis que la boîte reproduit la forme de l'intérieur.

La boîte comprend deux parties assemblées par goujons. On la remplit de sable puis on la retourne sur une plaque de tôle et on démoule en retirant successivement chacune des moitiés de la boîte (voir *fig.* 32).

## 2° Différentes positions des noyaux dans le moule.

a) **Le noyau prend appui dans le fond du moule.** C'est le cas de la *figure* 28. La portée peut être d'épaisseur assez réduite et est fortement en dépouille. Sa surface doit être assez grande afin que le noyau ait une position bien définie.

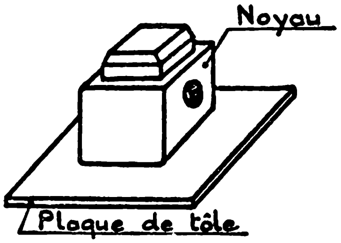



***Fig.* 32. — Séchage du noyau.**

b) **Le noyau prend appui sur le plafond du moule.** Dans ce cas, il doit être accroché. Des armatures sont alors nécessaires (*fig.* 33).

c) **Le noyau prend contact avec le dessous et le dessus du moule.**
Si le noyau n'est pas très haut, seule la portée inférieure suffit (voir *fig.* 34 A).

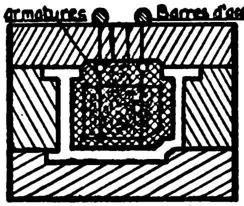


***Fig.* 33. — Moule avec noyau prenant appui sur le plafond.**

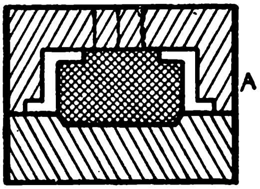



***Fig.* 34 A. — Moule avec noyau prenant appui dans le fond.**

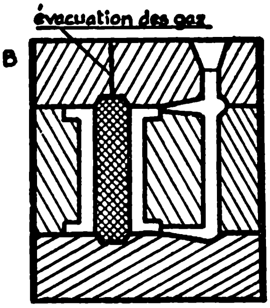



***Fig.* 34 B. — Moule avec noyau long prenant appui dessous et dessus.**

Si le noyau est long, on peut prévoir une portée à la partie supérieure.

Celle-ci, peu épaisse, sera fortement en dépouille afin d'éviter, en remoulant, de faire tomber du sable dans le moule (voir *fig.* 34 B).

d) **Le noyau prend appui contre une paroi verticale de l'empreinte.** Dans le cas où le noyau est court, on prévoit une portée à renflement (voir *fig.* 35).

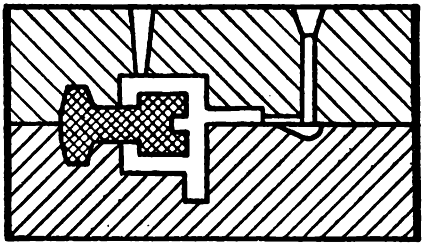


***Fig.* 35. — Moule avec noyau prenant appui contre une paroi verticale.**

Si le noyau est long, le porte-à-faux est trop grand ; on doit soutenir le noyau par des supports métalliques (petits U en tôle mince étamée, ou clous à large tête dont la pointe s'enfonce dans le sable du moule). Au moment de la coulée, l'étain fond, met à nu les surfaces bien propres du support et la soudure avec le métal en fusion peut se produire. La poussée du métal liquide sur le noyau doit être équilibrée par des supports à tige disposés au-dessus du noyau (voir *fig.* 36).

Comme on le voit, ce mode de moulage comporte de réelles difficultés et le dessinateur devra éviter de prévoir des pièces où le noyau a un trop grand porte-à-faux. Il serait préférable de supporter le noyau aux deux extrémités.

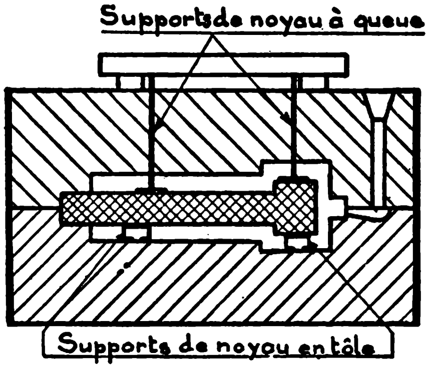



*Fig.* 36. — Moule avec noyau de grande longueur, supporté.

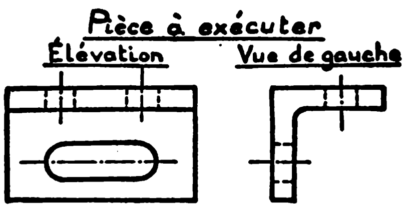



*Fig.* 37. — Pièce à exécuter.

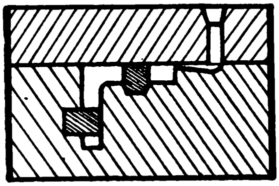


*Fig.* 38. — Moule terminé.

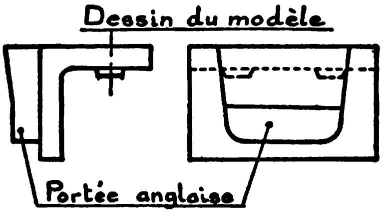



*Fig.* 39. — Modèle avec portée anglaise.

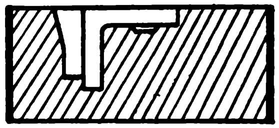


*Fig.* 40. — Partie de dessous de moule.

e) **La pièce comporte plusieurs noyaux situés à des niveaux différents.**

Dans ce cas, on doit réaliser le moulage avec chape. Si l'on veut éviter l'emploi d'un troisième châssis, on réalise le moulage par portée anglaise.

La *figure* 37 représente la pièce à réaliser et la *figure* 38 le moule terminé. On voit que le moule comprend un noyau noyé. Pour parvenir à le mettre en place, on prévoit un modèle conforme à la *figure* 39. On obtient ainsi le châssis de dessous représenté par la *figure* 40. On peut, dès lors, mettre le noyau en place et, à l'aide d'une planche à boucher destinée à retenir le sable, obturer

la partie A (*fig.* 41). Remarquons que l'on aurait pu parvenir au même résultat en réalisant un noyau comprenant les formes du trou et de la partie A. Mais cela aurait nécessité une boîte à noyau plus compliquée (*fig.* 42).

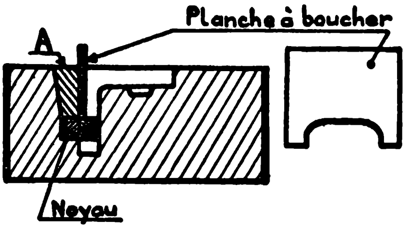



*Fig.* 41. — Mise en place du noyau.

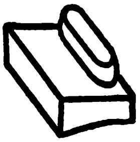


*Fig.* 42. — Dessin du noyau.

## 3° Propriétés des noyaux.

Un noyau doit :

a) **être solide** afin de résister à la poussée que le liquide exerce sur lui (principe d'Archimède). Sa résistance rend, en outre, les manipulations plus faciles au moment du remoulage ;

b) **être perméable** aux gaz produits au moment de la coulée ; d'ailleurs il faut que les corps qui le constituent ne produisent qu'un dégagement gazeux minimum sous l'action de la chaleur ;

c) **être infusible** pour éviter la pénétration à l'intérieur du métal ;

d) **pouvoir se désagréger facilement** après la coulée, pour qu'on puisse aisément enlever le sable demeuré dans les parties creuses des pièces.

## 4° Fabrication des noyaux.

Les sables utilisés sont préparés spécialement (sable d'étuve, sable à l'huile de lin), pour que les noyaux présentent les propriétés définies plus haut.

Les noyaux, petits ou moyens, sont confectionnés en sable à l'huile ; pour les travaux de série, ils sont exécutés dans des boîtes métalliques. Lorsque les noyaux sont assez importants, on les arme intérieurement d'une carcasse en fils de fer soudés pour faciliter leur fabrication.

Tous les noyaux doivent être séchés à l'étuve afin de leur donner la résistance et la perméabilité désirées.

Leur transport dans l'étuve nécessite des précautions : « à vert » les noyaux sont fragiles. Généralement on les pose sur des plaques d'acier ou de fonte. Aussi, est-il recommandé de prévoir des noyaux avec une large surface plane. S'ils présentent des formes compliquées, on est dans l'obligation de construire des supports spéciaux en métal ou en terre pour éviter qu'ils ne se déforment au contact de la plaque d'appui. On peut aussi les exécuter en deux parties qui seront collées avant remoulage.

## E. — Moulage avec motte battue

Nous avons vu que l'on pouvait, en utilisant une chape, mouler des pièces qui présentent des parties en contre-dépouille.

On peut arriver au même résultat :

1° **En utilisant un modèle en plusieurs parties démontables que l'on démoulera successivement** (voir *fig.* 43).

2° **En exécutant une motte battue** (voir *fig.* 44 à 47).

Sur une fausse partie A, on place le modèle et on supprime la partie en contre-dépouille par serrage d'une motte de sable au moyen d'un maillet (*fig.* 44). Les surfaces extérieures de la motte sont taillées fortement en dépouille. On peut dès lors serrer le châssis B puis, en retournant, le châssis C (*fig.* 45).

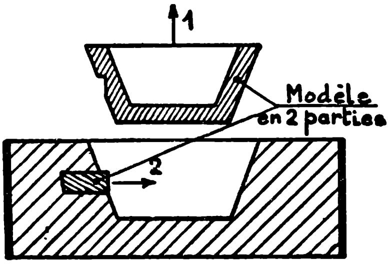



**Fig. 43. — Exécution du moule avec modèle en deux pièces.**

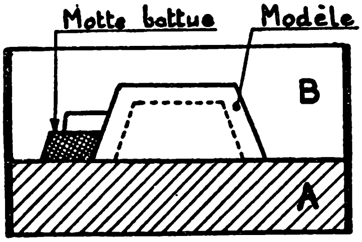



**Fig. 44. — Exécution de la motte battue.**

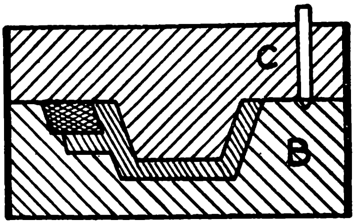



**Fig. 45. — Exécution du châssis de dessus.**

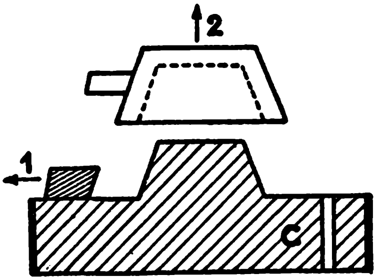



**Fig. 46. — Démoulage.**

**Démoulage : après enlèvement du châssis C, retirer d'abord la motte, puis le modèle (*fig.* 46).**

**Pour le remoulage, la motte battue, placée dans le châssis B, y est fixée au moyen de longues pointes (*fig.* 47).**

**Il est à noter que ce procédé de moulage, long et délicat, est rarement utilisé en moulage mécanique où la motte battue est remplacée par un noyau.**

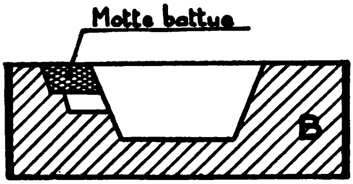



**Fig. 47. — Remoulage : mise en place de la motte battue.**

En fonderie d'art (moulage de statues, de bustes, d'animaux) on est obligé de battre un grand nombre de mottes pour rendre le modèle démoulable : cela nécessite de la part du mouleur beaucoup de soin, d'ordre et de dextérité.

## F. — Moulage en série

### 1° Généralités.

Supposons que l'on ait à réaliser un grand nombre de moules identiques à celui qui est représenté par la *figure* 48.

*Si l'on exécutait le moule à la main*, les opérations successives seraient les suivantes :

- 1° réalisation d'une fausse partie ;
- 2° serrage du châssis B sur cette fausse partie ;
- 3° serrage du châssis A sur le châssis B.

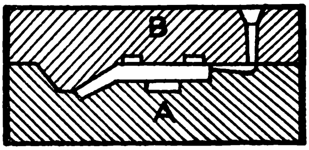



*Fig.* 48. — Moule terminé, à exécuter en série.

Remarque.

*a*) la fausse partie est, en principe, à refaire pour l'exécution de chaque moule ;

*b*) on aurait pu indifféremment exécuter une fausse partie permettant de réaliser le châssis A sur lequel on aurait ensuite serré le châssis B.

Donc, si l'on exécute deux fausses parties C et D suffisamment résistantes (*fig.* 49 et 50), on peut, sur chacune d'elles, serrer les châssis B et A ; on les assemble ensuite pour obtenir les moules dans lesquels les pièces seront coulées.

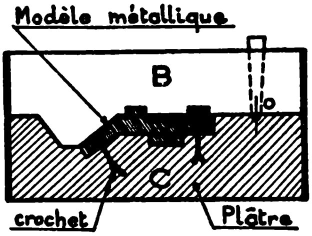



*Fig.* 49. — Couche en plâtre pour exécuter le châssis B.

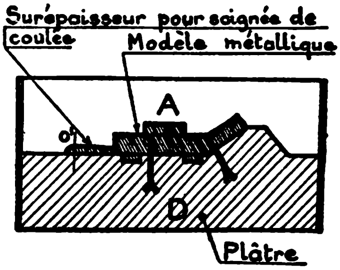



*Fig.* 50. — Couche en plâtre pour exécuter le châssis A.

### 2° Couches en plâtre.

Les deux fausses parties C et D peuvent s'exécuter en plâtre ; le modèle, noyé et fixé dans le plâtre au moyen de crochets, est métallique. On obtient ainsi une surface de joint résistante sur laquelle on peut serrer de nombreux châssis. Ces fausses parties s'appellent « couches en plâtre ».

Le détail de la fabrication de ces couches en plâtre sort du cadre de notre étude. On notera simplement que les parties C et D, qui doivent être conjuguées, sont exécutées avec beaucoup de soin.

## 3° Couche en plâtre avec joint métallique.

Lorsque la série des pièces à exécuter est importante, la surface de joint en plâtre risque de se détériorer. Pour lui donner plus de résistance, on la confectionne en métal coulé, également fixé dans le plâtre au moyen de crochets. On obtient ainsi les couches en plâtre, avec joint métallique C et D, représentées sur les *figures* 51 et 52.

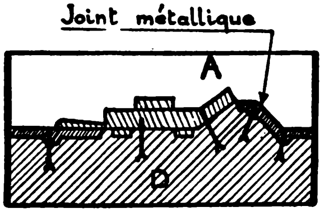



*Fig.* 51. — Couche en plâtre, avec joint métallique, pour exécuter le châssis A.

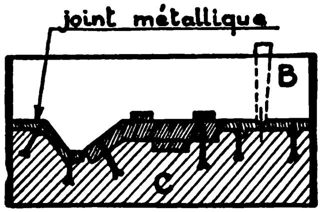



*Fig.* 52. — Couche en plâtre, avec joint métallique, pour exécuter le châssis B.

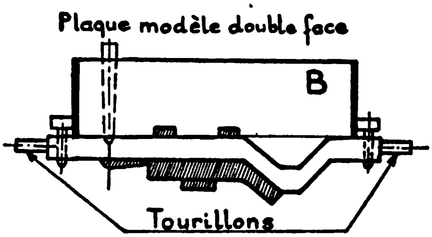



*Fig.* 53. — Plaque modèle double face. Serre du châssis B.

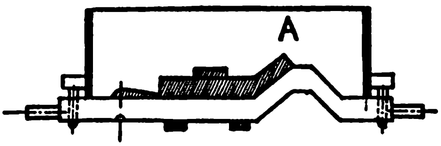



*Fig.* 54. — Plaque modèle double face. Serre du châssis A.

## 4° Plaque modèle double face.

Pour augmenter la résistance de la surface de joint, on peut l'exécuter entièrement en fonte ou en acier et lui donner une épaisseur à peu près uniforme. Elle prend alors le nom de plaque modèle. Un côté de la plaque a la forme du joint de la couche C et l'autre celle du joint de la couche D. Des parties de modèles seront disposées avec précision de chaque côté de la plaque et maintenues sur elle au moyen de vis. On peut dès lors utiliser la plaque en serrant successivement sur chacune de ses faces les châssis B et A comme le montrent les *figures* 53 et 54. Deux tourillons permettent de faire pivoter la plaque qui peut ainsi présenter vers le haut successivement chacune de ses faces.

## 5° Couche en plâtre et plaque modèle réversible.

Dans le moulage en série, on utilise des machines à mouler.

Lorsqu'on emploie des couches en plâtre, on doit utiliser simultanément deux machines pour exécuter en même temps les deux parties du moule. L'emploi de la plaque modèle à double face permet de n'immobiliser qu'une seule machine, mais après chaque opération il faut tourner la plaque.

La couche en plâtre réversible, ou la plaque modèle réversible, a permis de confectionner une série de moules avec l'utilisation d'une seule machine et sans manutentions inutiles.

Considérons deux couches en plâtre (*fig.* 49 et 50) que nous supposerons sectionnées au droit de O et O'. Plaçons-les côte à côte comme le représente la *figure* 55. Sur l'ensemble ainsi obtenu, on peut serrer un châssis ayant à gauche la forme du châssis B et à droite celle du châssis A.

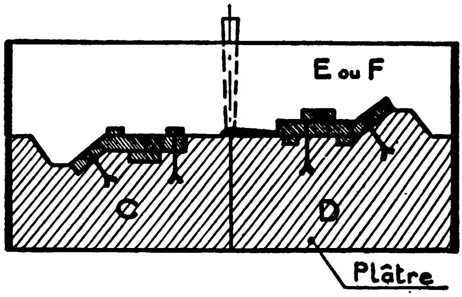



*Fig.* 55. — Constitution théorique d'une couche en plâtre réversible.

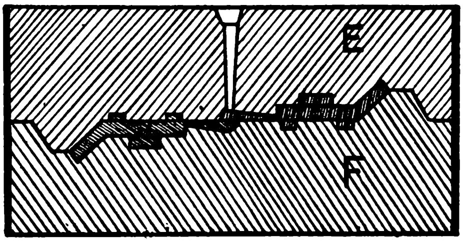



*Fig.* 56. — Moule de série terminé.

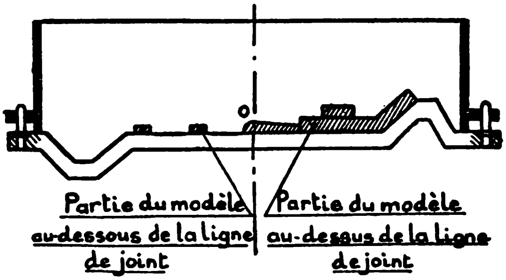



*Fig.* 57. — Plaque modèle réversible.

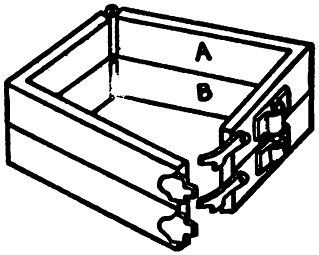



*Fig.* 58. — Châssis démontable pour moulage en série.

Deux châssis E et F, serrés sur cette couche et disposés l'un sur l'autre (*fig.* 56), permettent la coulée simultanée de deux pièces.

La couche en plâtre réversible, trop fragile, est remplacée pour le moulage en grande série par la plaque modèle réversible, *figure* 57.

Afin d'éviter l'immobilisation d'un trop grand nombre de châssis, on utilise, pour le moulage des pièces petites et moyennes, des châssis démontables (*fig.* 58).

Les deux parties du moule, exécutées successivement dans les châssis A et B sont assemblées sur l'aire de la fonderie. On démonte ensuite les deux châssis qui peuvent être à nouveau utilisés. Les deux mottes de terre superposées constituent le moule dans lequel on coule le métal.

# MACHINES A MOULER

## 1° But des machines à mouler.

Toute opération de moulage comprend :

*a*) la mise en place du modèle et l'exécution de la surface de joint ;

*b*) la serre du sable ;

*c*) le démoulage du modèle.

La première phase du moulage est réalisée dans le travail en série par l'utilisation de la couche en plâtre ou de la plaque modèle.

La serre du sable est une opération longue, que la machine à mouler permet d'écourter et de régulariser. Le démoulage du modèle, opération délicate, demande de la part du mouleur une grande dextérité.

Si le modèle n'est pas retiré bien verticalement, des parties de moule risquent d'être arrachées et des réparations deviennent nécessaires.

Les machines à mouler modernes effectuent à la fois la serre mécanique du sable et le démoulage du modèle.

## 2° Démoulage du modèle.

***Première méthode* (fig. 59).**

Le moule repose sur des supports fixes de la machine à mouler.

La plaque modèle est disposée sur une table, placée à l'extrémité d'un piston soulevé par de l'eau sous pression.

Lorsque le sable est serré, le piston redescend, entraînant la plaque modèle dans une direction perpendiculaire au plan de joint.

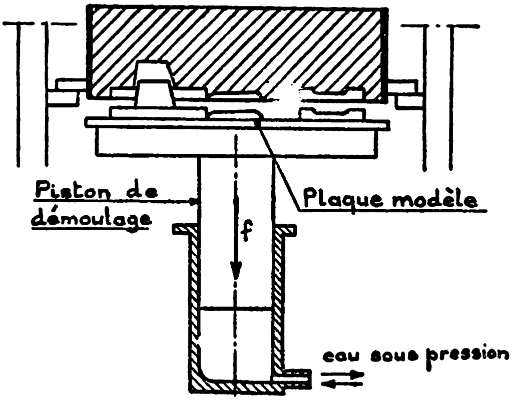



*Fig.* 59. — Schéma de principe du dispositif de démoulage par descente du modèle.

*Deuxième méthode* **(fig. 60).**

La plaque modèle repose sur une table fixe de la machine à mouler. Le châssis se place sur un cadre solidaire de pistons commandés par de l'eau sous pression. Après serre du sable, le châssis est soulevé par les pistons et le démoulage s'effectue.

Si le modèle présente des surfaces verticales assez hautes, une plaque découpée au profil de la pièce se soulève avec le châssis, soutient le sable et évite toute détérioration du moule. Cette plaque, appelée *peigne*, peut être également utilisée dans les machines du premier type (*fig.* 59).

*Troisième méthode.*

Elle est employée dans certaines machines à mouler qui utilisent des plaques modèles à double face (*fig.* 61).

Le châssis est fixé sur le dessus de la plaque modèle. On serre le sable, puis on retourne la plaque et le châssis. Pendant qu'on serre le second châssis, on procède au démoulage du premier. Pour cela, une table soulevée par de l'eau sous pression vient au contact du châssis. On libère alors le châssis et, la table redescendant, le démoulage se produit.

Inconvénient de cette méthode : le sable, qui risque d'être arraché, tombe à l'intérieur du moule.

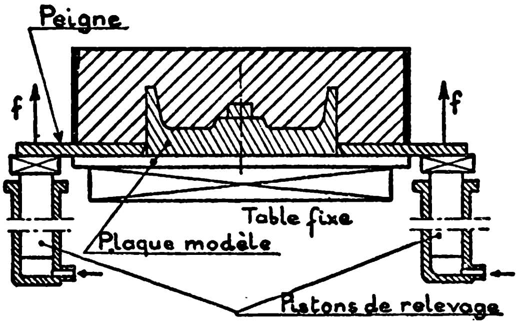



*Fig.* 60. — Schéma de principe du dispositif de démoulage par soulèvement du modèle.

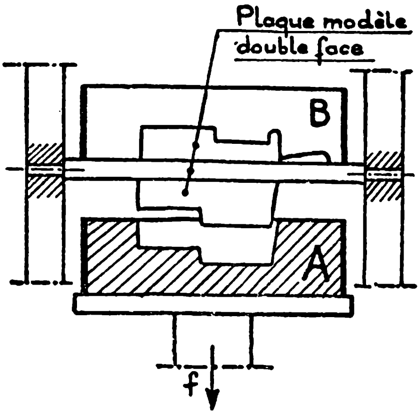



*Fig.* 61. — Schéma de principe d'une machine utilisant une plaque modèle double face.

## 3° Serrage du sable.

Le serrage mécanique peut être obtenu de deux façons :

a) **Par pression** (*fig.* 62).
Le sable est chargé à la pelle dans le châssis surmonté d'une rehausse. Ce châssis est ensuite soulevé, et un sommier fixe produit le tassement du sable.

La serre du sable par pression n'est pas uniforme et risque même d'être insuffisante en bas du châssis.

b) **Par secousses** (*fig.* 63).
Le châssis rempli, soulevé de quelques millimètres, retombe plusieurs fois de suite, et le serrage du sable est obtenu par inertie. Le nombre de secousses, qui peut atteindre 7 000 par minute, est produit par l'action de l'air comprimé, sous un piston qui se soulève jusqu'à ce que la lumière d'échappement se découvre. A ce moment une détente a lieu, et le piston retombe.

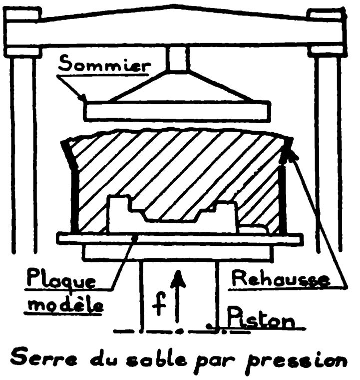



*Fig.* 62. — Schéma de principe du dispositif de serrage du sable par pression.

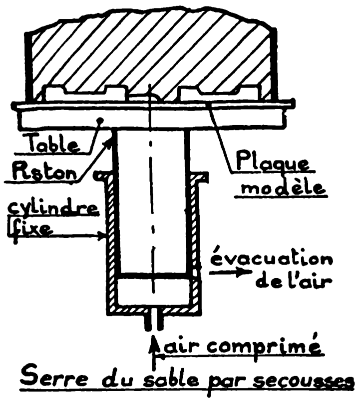



*Fig.* 63. — Schéma de principe du dispositif de serrage du sable par secousses.

Avec ce procédé, la serre du sable est maximum à la partie inférieure du sable.

Cette méthode complète donc fort heureusement la précédente.

Aussi, sur les machines à mouler modernes, le sable est d'abord serré par secousses, puis par pression.

## MOULAGE EN MOULES MÉTALLIQUES

Les alliages d'aluminium, de plomb, d'étain, de zinc, de cuivre, dont le point de fusion est assez bas, peuvent être coulés dans des moules en fonte ou en acier. Le prix de revient de ces moules étant assez élevé, leur emploi ne se justifie que pour la coulée en série de petites et moyennes pièces dont les formes sont assez simples.

Lorsque le métal liquide est versé directement dans le moule, les pièces obtenues sont dites « coulées en coquille ».

Quand l'alliage liquide est injecté dans le moule au moyen d'une pompe, on a réalisé le *moulage sous pression.*

La fusion de l'alliage est obtenue dans des fours à creuset en graphite ou en carborundum, chauffés au coke, au mazout, au gaz ou par résistances électriques.

A l'aide d'une louche en fonte, on prélève le métal dans le creuset pour le couler dans les moules.

## A. — Moulage en coquille

Le moule en fonte ou en acier, appelé *coquille*, est constitué par deux ou plusieurs pièces, assemblées par goujons cylindriques et verrouillées pendant la coulée. Les différentes pièces qui constituent la coquille ont été prévues pour permettre un démontage rapide et une extraction facile de la pièce. Dans les parties du moule, sont taillés les empreintes de la pièce, le canal de coulée et des évents. La forme de la pièce détermine les différents plans de joint. Pour permettre l'évacuation de l'air au moment de la coulée, de nombreuses rainures ont été prévues sur chaque face de joint. Ces rainures, appelées « tirées d'air », ont quelques dixièmes de mm de profondeur (voir *fig.* 64). Les noyaux, généralement métalliques, comportent aussi des petites cannelures d'évacuation d'air. Avant la coulée, les coquilles doivent être chauffées au moyen de brûleurs à gaz, à une température comprise entre 200 et 350° pour éviter que le métal en fusion ne se fige trop rapidement.

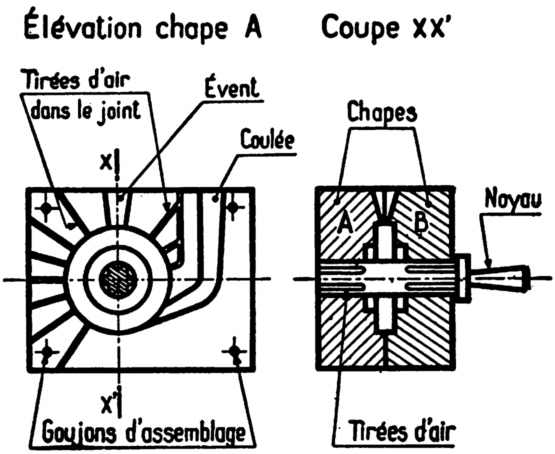



*Fig.* 64. — Moule métallique pour moulage en coquille.

## B. — Moulage sous pression

La coulée sous pression du métal en fusion dans des moules métalliques nécessite l'emploi de machines à mouler spéciales.

Ces machines comprennent une pompe d'injection du métal en fusion et un ensemble de chariots assurant le moulage et le démoulage des pièces par déplacement des différentes parties du moule (voir *fig.* 65).

Le moule est constitué par deux blocs d'acier A et B dans lesquels est gravée l'empreinte de la pièce. La partie B est fixée au bâti de la machine, l'autre partie A est montée sur le chariot mobile C. Des broches spéciales telles que G

permettent de réaliser dans la pièce des ouvertures de forme. Le joint est disposé de façon que la demi-coquille mobile A contienne la plus grande partie de la pièce ; ainsi, au cours du démoulage, la pièce adhère à la partie mobile du moule.

L'injection du métal, assurée par le déplacement du piston $P_1$ suivant $F_1$, se fait lorsque les deux parties du moule sont en contact.

Le démoulage nécessite successivement :

— le sectionnement de la saignée de coulée, obtenu par la montée du piston $P_2$ dans le cylindre ;
— le retrait de la broche G ;
— le déplacement du chariot C suivant $F_3$ ;
— l'extraction de la pièce par l'action des broches de démoulage commandées par le levier L qui agit sur le pignon et la crémaillère.

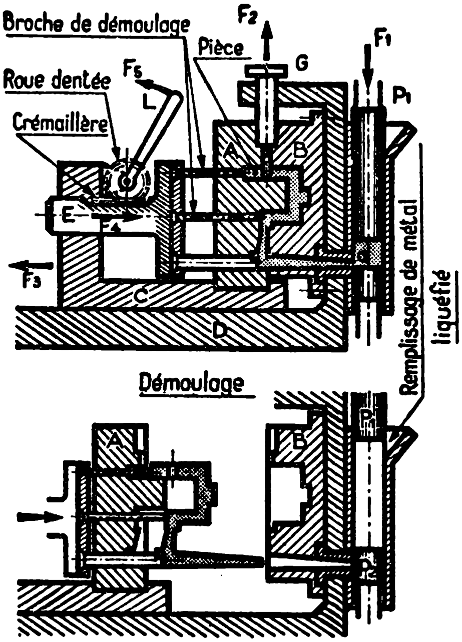



*Fig.* 65. — Machine à mouler sous pression.

On coule sous pression des alliages plomb-étain, zinc-étain-cuivre, aluminium-cuivre, aluminium-silicium, des laitons et des bronzes. Les pièces peuvent être obtenues sans dépouille ; la précision du moulage est de 0,1 à 0,05 mm. On peut ainsi, dans bien des cas, réaliser l'assemblage de pièces moulées sans usinage.

◇

# La forge

Le forgeage a pour objet la confection de pièces par déformation du metal à chaud sous l'action de chocs ou de pressions.

Il est basé sur la propriété qu'ont les métaux de passer par l'état pâteux avant de fondre et d'être, à ce stade, très malléables. Les pièces exécutées à la forge constituent, le plus souvent, des ébauches qui doivent subir, avant d'être utilisées, des opérations d'usinage à l'outil ou à la meule.

Le forgeage peut nécessiter la mise en action d'outils manœuvrés uniquement par l'ouvrier : forgeage à la main, ou de machines : forgeage mécanique.

Le forgeage à la main tend de plus en plus à disparaître. Le serrurier, le forgeron de campagne disposent souvent d'engins mécaniques.

La soudure à l'arc, qui est de plus en plus utilisée, a profondément modifié la forme donnée aux pièces. Celles qui étaient autrefois forgées sont maintenant obtenues par des éléments de formes simples assemblés par soudure.

La forge reste néanmoins utilisée dans les travaux de série et de très grande série. Elle apporte en effet des solutions simples et légères à des problèmes compliqués.

Nous nous proposons d'étudier les procédés mécaniques de forgeage.

## CHAUFFAGE DU MÉTAL

Le forgeage ne peut être exécuté dans de bonnes conditions qu'entre deux limites qui dépendent de la nature du métal. La limite inférieure est fixée par la nécessité d'avoir un métal suffisamment malléable pour que, sous l'action des chocs ou des pressions, le système cristallin ne soit pas trop perturbé. Le forgeage ne doit pas se faire pendant la période des transformations internes, parce qu'il se produit alors une absorption de chaleur qui pourrait conduire à des tensions internes ou à des *tapures*. La limite supérieure est fixée par le danger d'oxydation interne du métal, lorsqu'il est porté à trop haute température.

Les températures couramment réservées au forgeage sont : pour les aciers doux, 750° à 1 300° ; pour les aciers durs, 750° à 1 150° ; pour le duralumin, 375° à 425°. Lorsqu'il s'agit d'aciers spéciaux, il est prudent de suivre les conseils donnés par les fournisseurs.

Le chauffage se fait dans des fours chauffés au mazout, au coke ou au gaz. Pour éviter la décarburation superficielle, le four doit fonctionner à atmosphère réductrice.

# ENGINS DE FORGEAGE

## A. — Engins mécaniques de forgeage

**Les engins de forgeage mécanique comprennent :**

**a) Les engins travaillant par chocs :** marteaux-pilons et moutons.

**b) Les engins travaillant par pression :** presses et machines à forger.

### 1° Marteaux-pilons.

Ils utilisent, comme force motrice, soit la vapeur, soit l'air comprimé.

**a) *Pilons à vapeur* (fig. 1).**

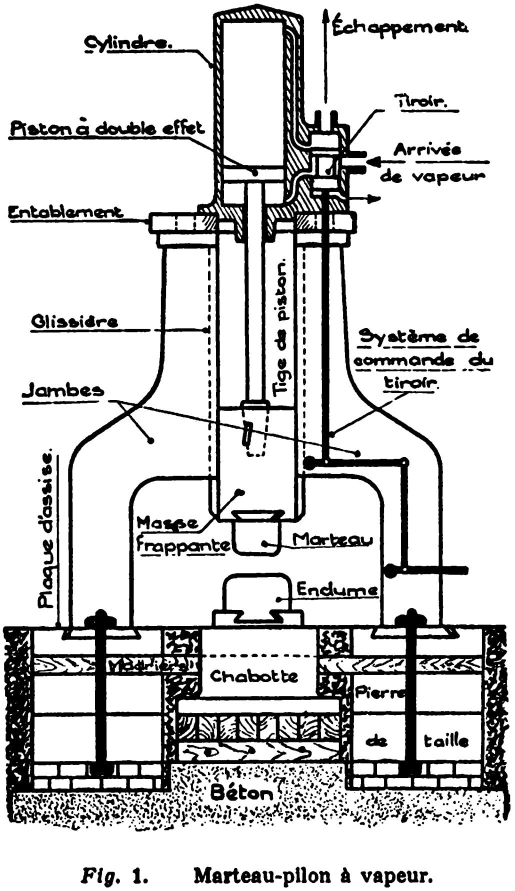



*Fig.* 1. Marteau-pilon à vapeur.

**L'outil** est constitué par un *marteau* en acier trempé, solidaire d'une masse frappante soulevée par l'action de la vapeur agissant sous un piston.

**Le support de pièce** comprend une *enclume* en acier trempé, fixée sur une pièce massive en fonte appelée *chabotte.*

Le marteau-pilon est dit *à simple effet* lorsque la vapeur agit sous le piston pour soulever la masse frappante qui retombe ensuite de son propre poids sur la pièce. Il est dit *à double effet* lorsque la vapeur, après avoir soulevé le marteau, agit sur le dessus du piston pour accélérer la descente de la masse frappante, donnant ainsi plus de force au coup.

La distribution de la vapeur s'effectue par un tiroir commandé au moyen d'un système de leviers actionnés par l'aide-forgeron.

Une ou deux *jambes* en fonte coulée servent à la fois à guider la masse et à soutenir le cylindre. Lorsque le pilon comporte deux jambes, celles-ci sont réunies par une *plaque d'assise.*

Les **fondations** comprennent, notamment sous la chabotte, un *sommier élastique* constitué par deux ou plusieurs lits de madriers dont le but est d'amortir les chocs, et une *masse* importante *de béton* destinée à absorber l'énergie excédentaire non utilisée pour la déformation du métal travaillé.

La masse frappante varie de 100 kg à environ 30 000 kg et la hauteur de chute de 1 à 3 m. La masse de la chabotte est d'environ 10 à 20 fois celle de la masse frappante.

### b) *Marteaux-pilons à air comprimé.*

Ils comprennent les mêmes éléments qu'un marteau-pilon à vapeur. L'air comprimé peut être produit par un compresseur indépendant du pilon ou faisant corps avec lui. Ces marteaux sont de moyenne ou de petite puissance, la masse frappante variant de 25 kg à 2 000 kg. Leur mise en marche est facile et le nombre de coups par minute, en général élevé (100 à 250).

## 2° Moutons.

Ce sont des engins mécaniques dans lesquels l'énergie de choc est uniquement due à la *chute libre* de la masse frappante. La hauteur de chute est plus grande que celle des pilons et peut varier entre 3 et 6 m.

Le relèvement de la masse s'obtient par *friction :* action de deux rouleaux tournant en sens inverse et agissant sur une planche verticale fixée à la masse frappante (*mouton à planche*) ou par le frottement d'une courroie en poil de chameau sur le tambour moteur (*mouton à courroie*) (*fig.* 2).

Le *galet enrouleur*, commandé par l'aide-forgeron, exerçant sa pression sur la courroie, permet au tambour moteur de soulever la masse frappante qui se trouve guidée par deux glissières verticales. Un *frein à came* assure l'arrêt de la masse en fin de course ascendante. Une charpente métallique supporte le mécanisme de commande.

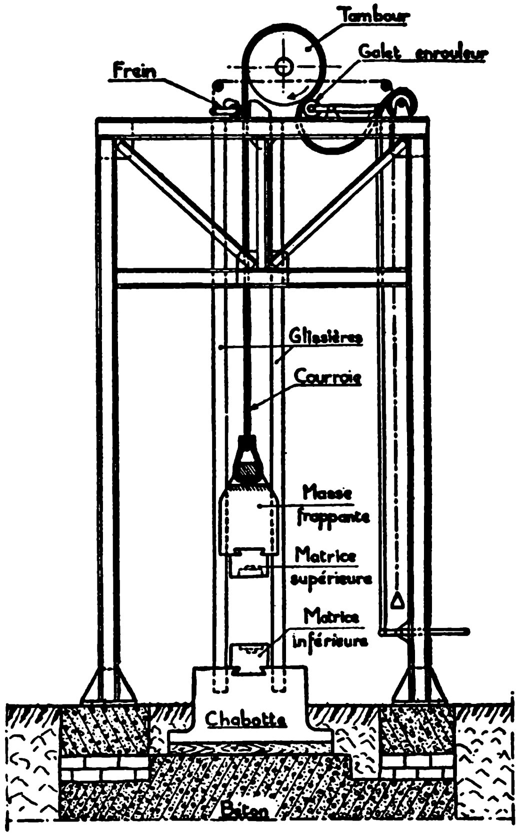



*Fig.* 2. — Mouton à courroie.

La *chabotte* peut être posée directement sur un bloc de béton plus important que celui qui est prévu pour un marteau-pilon de même puissance ; cependant on interpose souvent un seul lit de madriers pour éviter l'effritement du béton. En raison du manque d'élasticité des fondations, le choc est plus brutal et les effets d'inertie beaucoup plus importants que dans le forgeage au pilon. Cela explique l'emploi de ces engins pour l'estampage ou le matriçage.

## 3° Presses.

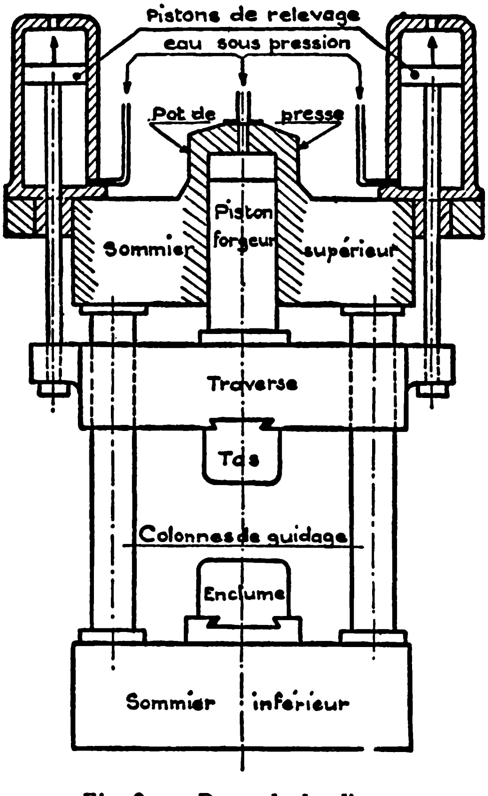



*Fig.* 3. — Presse hydraulique.

Les presses employées pour le forgeage utilisent, soit simplement la pression hydraulique, soit l'action combinée de l'eau sous pression et de la vapeur.

La *figure* 3 représente le schéma d'une presse hydraulique. L'action de l'eau sous pression agit sur un *piston forgeur*, et produit la descente d'une traverse portant le *tas* qui écrase le métal sur l'enclume fixée au sommier inférieur. Deux cylindres disposés latéralement remontent la traverse.

L'effort fourni par ces presses est très grand, il peut atteindre 4 000 tonnes-poids ; la vitesse est faible.

## 4° Machines à forger.

Ces machines sont généralement à commande mécanique, le déplacement de l'outil étant horizontal. La *figure* 4 représente une machine à forger horizontale travaillant par refoulement. L'outil est constitué par une série de *poinçons* $P_1$ et $P_2$ fixés sur un *chariot mobile* R, lui-même commandé par une bielle articulée sur un arbre vilebrequin. La pièce est une barre ronde placée entre deux *matrices*, l'une $M_1$ fixe et l'autre $M_2$ mobile. La pièce s'introduit par l'ouverture du bâti C lorsque le chariot R est reculé et la matrice $M_2$ dégagée. Lorsque le chariot se dirige vers la pièce, un système de leviers articulés en O, $O_1$ et $O_2$ provoque le rapprochement de la matrice $M_2$ qui vient coincer la barre dans son logement et permet au poinçon de refouler le métal.

Exemple d'utilisation. — La *figure* 5 représente les trois opérations nécessaires pour l'exécution de l'ébauche d'un *écrou à embase.*

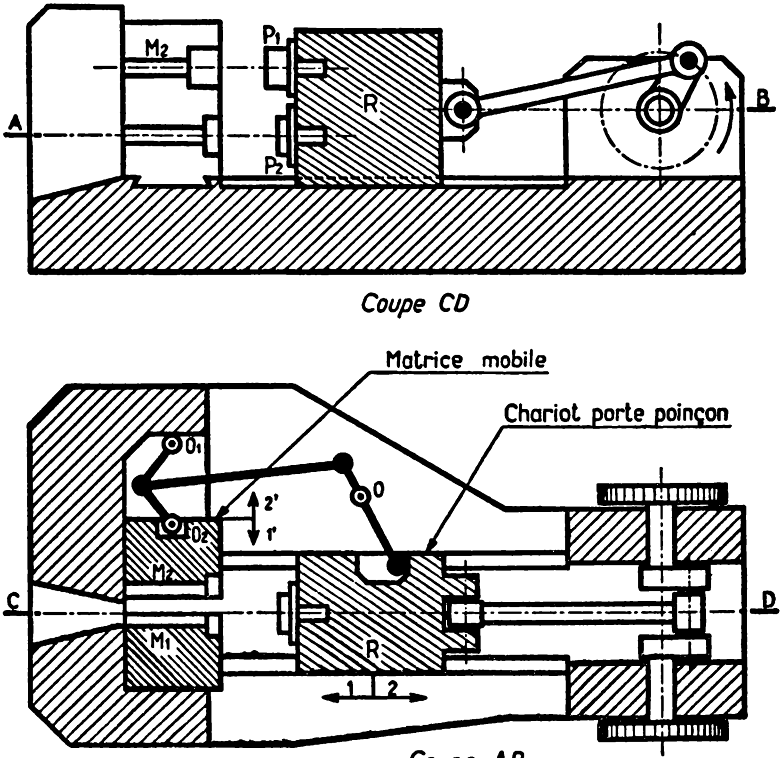



*Fig.* 4. — Machine à forger.

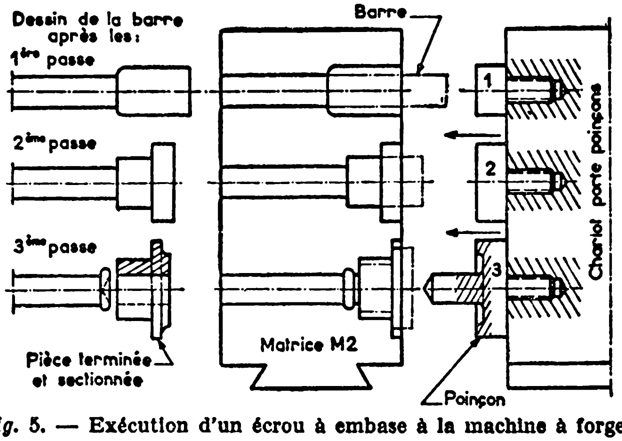



*Fig.* 5. — Exécution d'un écrou à embase à la machine à forger.

Au cours de la première passe, la barre, grâce à l'action du poinçon 1, est refoulée à un diamètre inférieur à celui du corps. La barre, placée ensuite dans la deuxième empreinte de la matrice, est refoulée à nouveau et l'embase prend corps. Enfin, au cours de la troisième passe, le poinçon 3 met la pièce aux cotes, provoque la perforation de l'écrou et son sectionnement. Le bourrelet prévu à l'extrémité de la barre permet d'obtenir une fin de poinçonnage correcte et le détachement de la barre.

Ces machines, à grand rendement, permettent d'utiliser une main-d'œuvre peu expérimentée.

## B. — Méthodes d'exécution des pièces forgées

Les principes de forgeage mécanique sont, d'une façon générale, les mêmes que dans le travail à la main. Une seule différence cependant : le *forgeage à la main* cherche à éviter l'étirage et le refoulage, opérations longues et pénibles ; le *forgeage au pilon* ne connaît plus ce souci.

Les procédés de travail pourront être modifiés d'après le nombre de pièces à exécuter.

a) **Pièce unitaire ou très petites séries.**

Les pièces sont ébauchées et terminées au pilon en utilisant les outils courants. Quelquefois, certaines opérations peuvent être faites à l'enclume avec des outils à main.

b) **Séries de moyenne importance.**

Ebauche au pilon avec les outils ordinaires et finition dans une matrice, sorte de moule métallique portant l'empreinte de la pièce.

c) **Séries importantes.**

Ebauche au moyen d'outillages spécialement créés et finition dans des matrices. Il est à noter que l'on peut réaliser des pièces de forme simple, pouvant être prises dans une barre laminée, sans ébauche, directement par matriçage.

### 1° Exécution d'une pièce ou d'une ébauche au pilon.

**Outillage de pilon.**

Les outils utilisés au pilon ont des formes qui rappellent celles des outils à main.

Ils sont fabriqués en acier demi-dur trempé et revenu, car ils doivent présenter le maximum de dureté et de résilience. Le manche n'est plus en bois mais en acier, et fait souvent corps avec l'outil. Il présente une partie amincie qui lui

donne l'élasticité suffisante pour que l'ouvrier ne ressente pas exagérément les réactions dues au choc lorsque l'outil est mal placé.

L'**étirage** a lieu directement sur l'enclume par passes successives, comme le montre la *figure* 6.

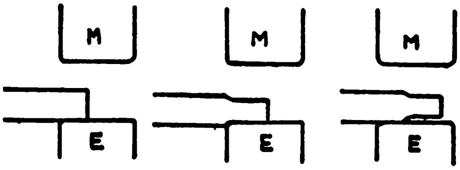



*Fig.* **6. — Étirage au pilon.**

Les **dégorgeoirs** ont des formes représentées par les *figures* 7, 8 (demi-lune), 9 (rond) et 10 (dégorgeoir à pincette). Les *figures* 11 à 14 montrent les conditions d'emploi de ces outils qui sont les mêmes que dans le forgeage à main.

Le dégorgeoir qui fait l'objet des *figures* 15 et 16 est utilisé pour le travail des pièces rondes.

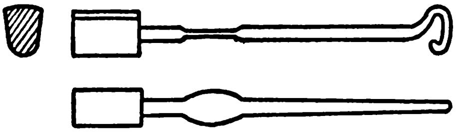


*Fig.* **7.**

*Fig.* **8.**

*Fig.* **9.**

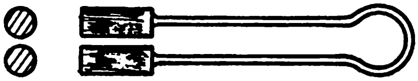


*Fig.* **10.**

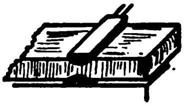


*Fig.* **11.**

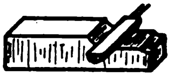


*Fig.* **12.**

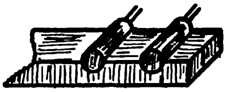


*Fig.* **13.**

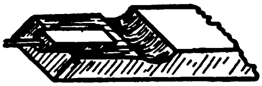


*Fig.* **14.**

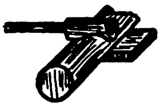


*Fig.* **15.**

*Fig.* **16.**

*Fig.* **7 à 16. — Exemples d'application des dégorgeoirs de pilons.**

Pour l'**étirage des pièces entre deux bossages**, on utilise des *tasseaux* carrés, rectangulaires, à angles arrondis ou à champ rond (voir *fig.* 17, 18).

Lorsque l'épaulement doit être assez profond et présenter une face verticale, on utilise le *triangle* (*fig.* 19), outil dont la section est un triangle rectangle isocèle à angles arrondis. Les *figures* 20 et 21 montrent comment il doit être employé.

Le **tranchet** (*fig.* 22) remplace la tranche. Il ne comporte pas d'angle vif, mais un simple plat de 3 à 4 mm de large.

Pour le **poinçonnage**, on utilise un poinçon légèrement conique vers l'arrière et légèrement creux sur l'extrémité en contact avec la pièce. Cette forme permet à l'outil de travailler dans de bonnes conditions de coupe (voir *fig.* 23). Pour agrandir le trou, on utilise un mandrin comprenant une partie conique, puis une partie cylindrique (voir *fig.* 24). La pénétration de ces deux outils est provoquée par chocs, au marteau-pilon, ou par pression, à la presse.

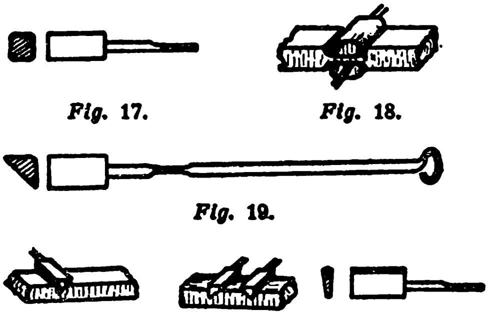


*Fig.* 17. *Fig.* 18. *Fig.* 19. *Fig.* 20. *Fig.* 21. *Fig.* 22.

*Fig.* 17 à 22. — **Carrés, triangle et tranchet.**

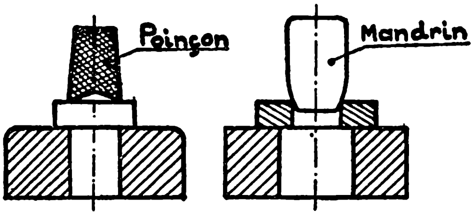



*Fig.* 23. *Fig.* 24.

*Fig.* 23 et 24. — **Poinçonnage.**

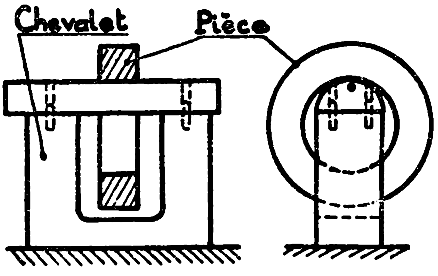



*Fig.* 25. — **Chevalet pour bigornage.**

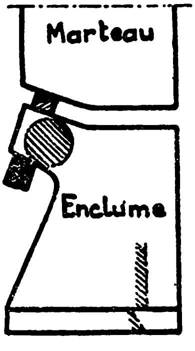



*Fig.* 26. — **Outillage spécial pour bigornage.**

Le **bigornage** s'effectue en utilisant un chevalet posé sur l'enclume du pilon (*fig.* 25), ou en équipant cet engin d'une enclume et d'un marteau spéciaux (*fig.* 26).

L'étampage se fait avec des étampes à manche métallique dont les formes sont identiques à celles utilisées pour le travail à la main (*fig.* 27).

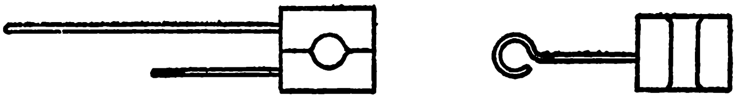


*Fig.* 27. — Étampes.

## 2° Matriçage et estampage.

Un jeu de matrices comprend deux blocs en acier au carbone demi-dur, dur ou en acier nickel-chrome qui ont été, après usinage, trempés et revenus de façon à donner au métal le maximum de dureté et de résilience.

L'empreinte de la pièce a été gravée à la fraise et au grattoir dans chacune des deux parties. L'ébauche se place entre les deux parties. Par chocs (*pilon*) ou par pression (*presse*), on oblige le métal chaud à remplir complètement le creux prévu. L'excédent de matière s'écoule dans un logement aménagé tout autour de l'empreinte.

Pour que la pièce puisse, après forgeage, être retirée des matrices, il est nécessaire que ses faces extérieures soient fortement en dépouille.

On distingue deux types de matrices :

### a) *Les matrices volantes.*

Elles sont constituées par deux blocs parallélépipédiques assemblés par goujons. Après avoir placé, dans son logement, l'ébauche de la pièce, on porte la matrice sur l'enclume d'un pilon ou d'une presse et on fait agir le marteau.

Cette opération s'appelle le **matriçage.**

Dans ce genre de travail, les oxydes produits restent emprisonnés autour de la pièce et s'incrustent dans le métal. D'autre part, la pièce se refroidissant vite au contact des matrices, celles-ci s'échauffent et se détériorent rapidement. On n'effectue avec ces matrices que des séries de 400 ou 500 pièces (voir *fig.* 28).

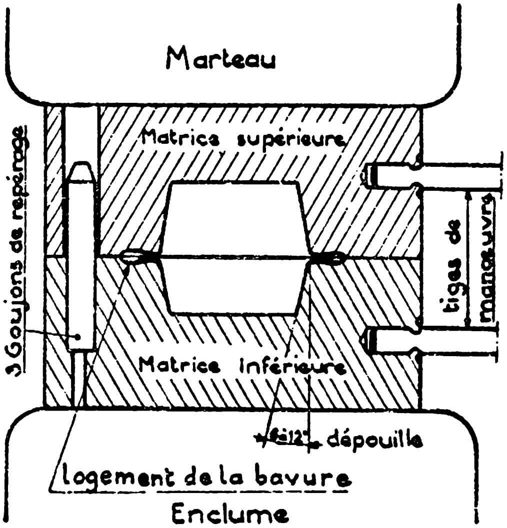



*Fig.* 28. — Matrices volantes.

**b) *Matrices fixes.***

Les *figures* 29 et 30 représentent deux matrices fixes.

Deux parties en acier spécial, dont l'une est fixée à la masse frappante et l'autre à la chabotte, constituent une matrice fixe. Leur position doit être parfaitement repérée pour que les deux empreintes coïncident. On remarquera sur les deux figures l'ouverture prévue pour le passage de l'extrémité de la pièce, appelée *queue* ou *prise de fer*. La prise de fer est seulement utilisée pour faciliter la manœuvre des petites et moyennes pièces.

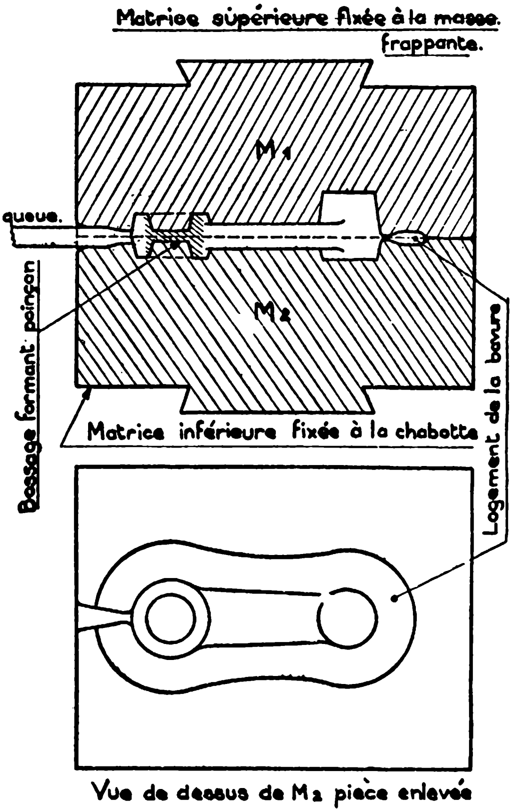
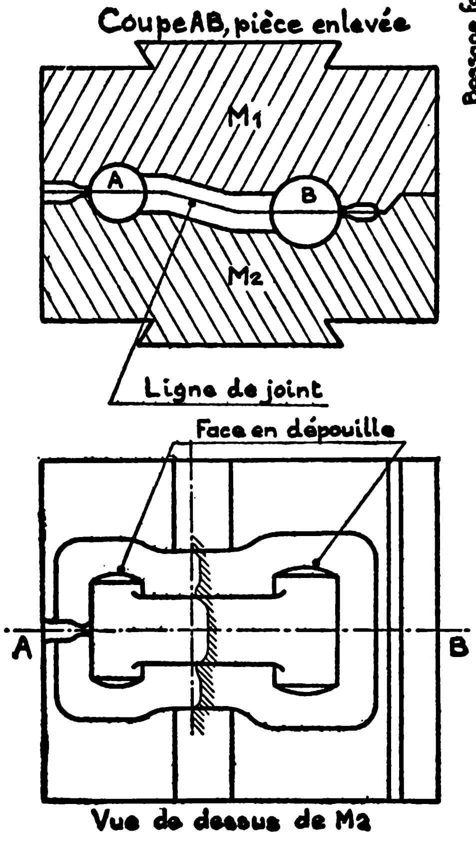



*Fig.* 29. — Matrice fixe.

Le bossage de gauche de la pièce exécutée avec la matrice (*fig.* 29) a été prévu poinçonné. Mais le poinçonnage complet ne peut être obtenu directement ; on laisse toujours une toile entre les deux parties du poinçon.

La *figure* 30 représente la matrice prévue pour l'exécution d'une pièce avec ligne de joint brisée.




← *Fig.* 30. — Matrice fixe à joint brisé.

Il est facile de comprendre que le joint d'une pièce matricée ne saurait être très tourmenté. On doit donc rechercher les formes les plus simples pour ce genre de pièces. Comme en fonderie, les pièces doivent être prévues avec une dépouille assez importante.

Le travail aux matrices fixes porte le nom d'*estampage.* Il s'effectue le plus souvent au mouton. Ces matrices, plus résistantes que les matrices volantes, permettent d'obtenir une plus grande précision : on estampe, à l'heure actuelle, des pièces à moins de 1/10 de mm près.

### c) *Matrices pour le travail en grande série.*

Ce sont des matrices fixes qui comportent, avec l'*empreinte de finition,* des parties permettant de réaliser l'ébauche de la pièce : *dégorgeage, étirage, cambrage.*

La *figure* 31 représente le dessin d'une matrice et la gamme de fabrication d'un levier coudé.

1° **L'étirage de la queue est réalisé au moyen de la partie arrondie 1.**

2° **L'étirage entre bossages se fait sur la partie plate 2.**

3° **Le cambrage est obtenu dans l'empreinte 3.**

4° **L'estampage est réalisé dans l'empreinte 4.**

5° **Le sciage de la barre.**

6° **L'ébavurage.**

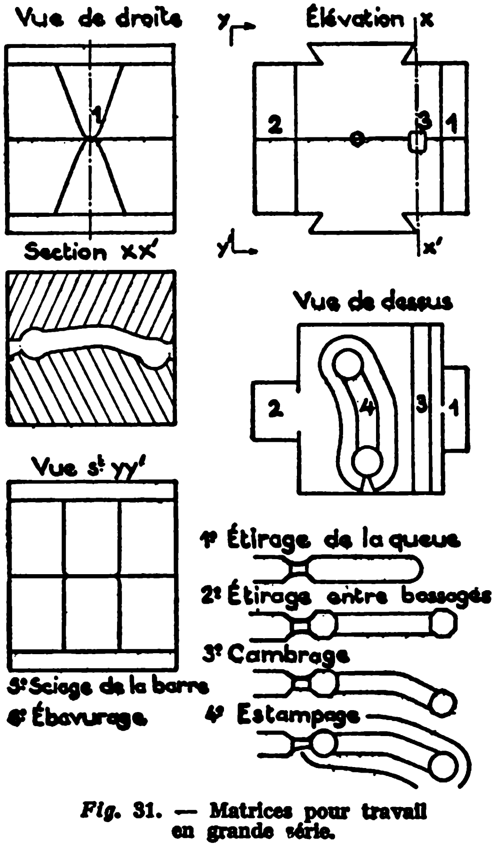



*Fig.* 31. — **Matrices pour travail en grande série.**

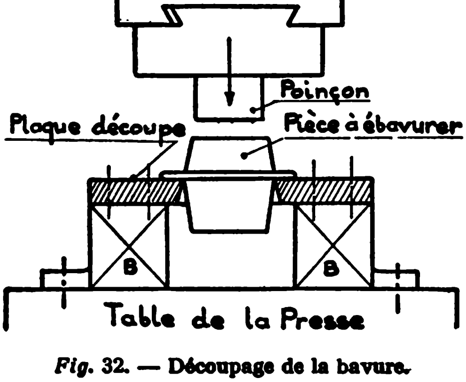



*Fig.* 32. — **Découpage de la bavure.**

### 3° Découpage de la bavure.

**Il est généralement obtenu à la presse en obligeant la pièce à traverser une plaque découpée à son profil (voir *fig.* 32).**

## 4° Comparaison entre le travail au mouton, au pilon et à la presse (*fig.* 33).

L'essai est effectué sur un lopin cylindrique au moyen d'une matrice montée successivement sur ces trois engins de forgeage. On constate que le métal a tendance à monter dans la matrice supérieure lorsqu'on travaille au mouton et au pilon. Quand on utilise la presse, le métal se trouvant écrasé se répartit également dans les deux parties de la matrice. Le déplacement ascendant du métal, dû à l'inertie, atteint son maximum dans le travail au mouton, car la chabotte de cet engin repose pratiquement sur le bloc de béton sans interposition de sommier élastique.

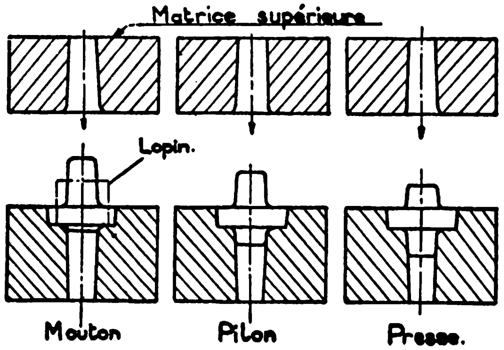



*Fig.* 33. — Comparaison entre le travail au mouton, au pilon et à la presse.

Lorsqu'on exécute des matrices destinées à être montées sur des pilons ou des moutons, l'empreinte la plus profonde est prévue dans la partie supérieure.

## 5° Soudage.

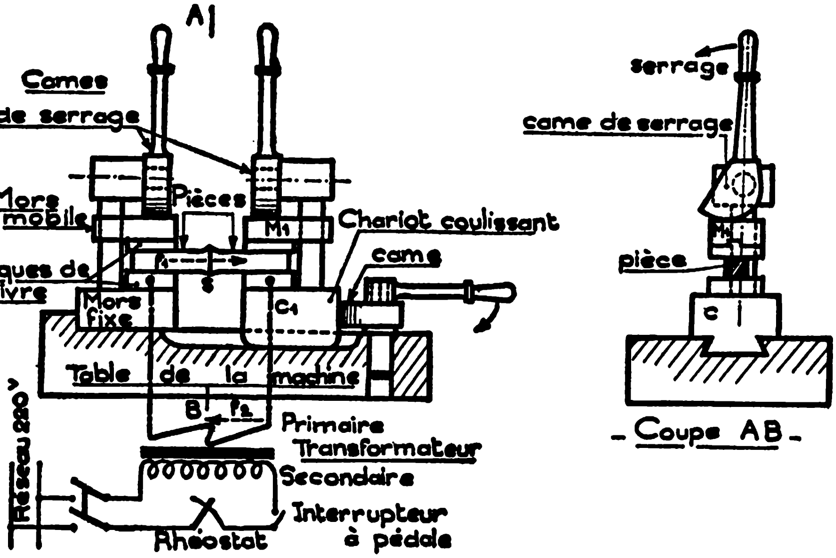



*Fig.* 34. — Schéma d'une machine à souder en bout par refoulement.

Les soudages peuvent se faire par les mêmes méthodes que dans le forgeage à main.

Mais, de plus en plus, on utilise des *machines électriques à souder en bout.*

La *figure* 34 donne le schéma de principe d'une de ces machines.

Les pièces à souder sont serrées entre deux mors garnis de plaques de cuivre refroidies par un courant d'eau.

La pièce de droite est montée sur un chariot $C_1$ que commande une came.

Les mors sont en liaison électrique avec le secondaire d'un transformateur. Lorsque les pièces viennent en contact, un courant électrique les traverse et provoque, à l'endroit où la résistance est maximum, en S, un grand dégagement de chaleur ; la température du métal devient égale à celle du blanc soudant. Il suffit de rapprocher alors le chariot $C_1$ du mors fixe pour refouler le métal et produire la soudure. On martèle la partie refoulée pour améliorer la résistance de la pièce.

# Le travail mécanique des métaux en feuilles : emboutissage

Le travail des métaux en feuilles a pour but la fabrication de pièces en tôle par déformation du métal, à froid, sous l'action de chocs ou de pressions. On utilise ici la propriété qu'a le métal de prendre des déformations permanentes avant de se rompre. On emploie donc de préférence des métaux très malléables, acier extra-doux ou doux, certains aciers spéciaux, le cuivre, le laiton, l'aluminium, quelques alliages d'aluminium ou de magnésium, le zinc, l'étain.

Les pièces en tôle, encore appelées pièces chaudronnées, subissent rarement une opération d'usinage avant d'être utilisées.

Les déformations de la tôle s'obtenant à froid, le plus souvent par martelage, le métal s'écrouit rapidement pendant le travail; des recuits successifs sont donc nécessaires au cours de la fabrication.

Il est intéressant de rapprocher le travail des métaux en feuilles du forgeage qui a pour objet de produire des déformations par chocs et pression, sur du métal chauffé.

On retrouvera quelques analogies dans l'outillage employé et dans les principes de fabrication.

Le travail des métaux en feuilles peut s'effectuer :

**A la main**, lorsque l'ouvrier trace, découpe, met en forme et assemble les tôles en utilisant des outils et des machines simples ;

**Mécaniquement**, lorsque ce sont les outillages montés sur des machines (presses) qui réalisent les opérations citées plus haut ; le rôle de l'ouvrier se borne à approvisionner les machines et à les mettre en route. Dans ce cas, le travail porte le nom d'*emboutissage.*

# GÉNÉRALITÉS SUR L'EMBOUTISSAGE

## A. — Définition

L'emboutissage consiste à former un objet creux à partir d'une plaque de tôle préalablement découpée.

D'une façon générale, on peut admettre que l'épaisseur finale de la tôle reste égale à son épaisseur initiale. Pour parvenir à ce résultat, on est conduit à refouler le métal dans certaines parties, puis à l'étirer. Toutes ces opérations doivent êtres exécutées sans que la résistance à la rupture du métal soit dépassée.

## B. — Métal employé

Il faut que le métal employé puisse supporter, sans danger de rupture, des déformations importantes. On utilise des métaux très malléables qui présentent un grand pourcentage d'allongement : acier extra-doux au carbone, aciers spéciaux, aciers inoxydables à grand allongement, cuivre, laitons, aluminium et quelques-uns de ses alliages, etc.

Ces métaux s'emploient à l'état recuit, ce traitement thermique ayant pour effet de leur donner le maximum de malléabilité.

## C. — Principe de l'emboutissage cylindrique

Le formage de la pièce est obtenu par l'action d'un poinçon qui oblige la plaque de tôle découpée à pénétrer à l'intérieur d'une matrice.

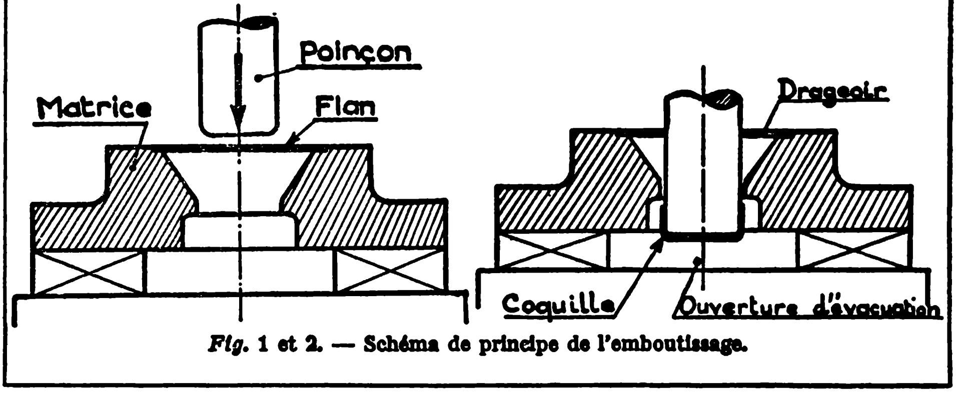



*Fig.* 1 et 2. — Schéma de principe de l'emboutissage.

L'opération s'effectue à l'aide d'une presse, le poinçon étant fixé au coulisseau et la matrice placée sur la table.

Le poinçon épouse la forme intérieure de la pièce et la matrice comporte une partie cylindrique de même directrice que l'extérieur de l'objet fabriqué.

Les *figures* 1 et 2 schématisent le principe de l'emboutissage.

La tôle est d'abord découpée dans une matrice de découpage, à la forme et aux dimensions jugées nécessaires pour l'exécution de l'embouti. Cette tôle découpée porte le nom de *flan*.

Le flan se place dans un creux annulaire ou *drageoir* prévu à l'intérieur de la matrice, et qui a pour but de centrer la tôle par rapport à l'ouverture d'emboutissage.

En descendant, le poinçon oblige la tôle à passer dans l'ouverture de la matrice pour former, autour de lui, une coquille cylindrique (*fig.* 2). Lorsque le poinçon remonte, la coquille, s'accrochant à la partie inférieure de la matrice, se détache, tombe et peut être évacuée par une ouverture ménagée à cet effet.

## D. — Forme des matrices d'emboutissage curviligne

Considérons l'emboutissage d'un flan, assez épais, par une matrice présentant, à la partie supérieure, un raccordement de rayon R important (cinq à six fois l'épaisseur de la tôle). Il est aisé de comprendre qu'une compression latérale de la tôle se produit pendant sa descente dans la matrice, compression due à la diminution progressive du flan circulaire dont le diamètre doit finalement devenir égal à celui du poinçon.

On constate une tendance au plissement et une augmentation d'épaisseur sur les bords : $e' > e$, $e$ étant l'épaisseur initiale de la tôle (*fig.* 3).

La descente du poinçon continuant, la tôle plus épaisse, coincée entre le poinçon et l'arrondi de la matrice, se lamine en s'allongeant.

Pour faciliter le glissement du métal il faut :

*a*) lubrifier le métal à la graisse,

*b*) utiliser une tôle bien décapée,

*c*) prévoir des arrondis d'un rayon égal à quatre ou cinq fois l'épaisseur de la tôle. Des arrondis trop faibles empêchent le glissement du métal ; la tôle s'allonge démesurément et risque même de se casser.

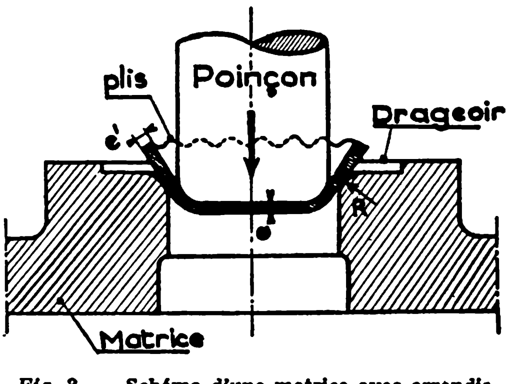



*Fig.* 3. — Schéma d'une matrice avec arrondis.

La *figure* 4 représente une deuxième forme de matrice comportant une partie tronconique qui précède la partie cylindrique.

Au cours de l'opération d'emboutissage, le flan se plaque sur la matrice, la tendance à la formation de plis s'atténue et la compression latérale du métal a lieu plus normalement.

## E. — Comparaison entre le travail d'emboutissage effectué avec les deux matrices

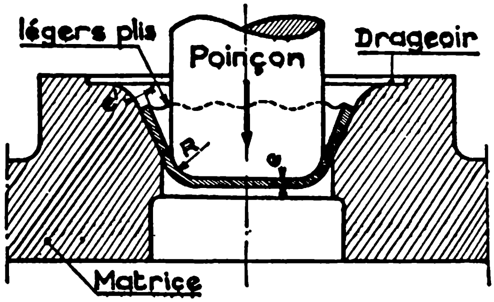


*Fig.* 4. — Schéma d'une matrice avec entrée conique.

Nous avons vu que les plis formés avec la matrice (*fig.* 3) sont les plus importants. Lorsque se produit le laminage du métal entre la partie cylindrique de la matrice et le poinçon, des zones fortement écrouies se forment au droit de chaque pli et constituent un danger de rupture verticale de l'embouti. Il est évident que cet inconvénient est moins sensible pour la matrice tronconique (*fig.* 4).

## F. — Emboutissage de tôle mince

L'étude que nous venons de faire supposait l'utilisation d'une tôle d'épaisseur moyenne. S'il s'agit de tôle mince ($e < 1$ mm), on constate, pendant la descente du poinçon, la formation de plis très accentués qui peuvent même se refermer. En se laminant ensuite entre poinçon et matrice, les plis se trouvent écrasés et la tôle finit par se briser.

Il apparaît donc nécessaire, dans tous les cas, d'éviter la formation de plis. Pour parvenir à ce résultat, on adjoint un *serre-flan* à l'outillage élémentaire, comprenant poinçon et matrice.

## G. — Matrice avec serre-flan

Le principe de ces outillages est mis en évidence par les *figures* 5 et 6.

Le serre-flan est une bague qui exerce une pression sur la tôle et dans laquelle coulisse le poinçon. Son action, qui commence avant celle du poinçon, s'exerce pendant l'emboutissage et subsiste lors de la remontée de l'outil.

La tôle, se trouvant pressée, glisse lentement pendant l'opération d'emboutissage et les plis ne peuvent se former.

D'autre part, le serre-flan demeure en place pendant la remontée du poinçon ; aussi l'embouti reste-t-il dans la matrice au lieu d'être entraîné par le poinçon.

La pression du serre-flan sur la tôle doit être convenablement choisie : si elle est trop forte, le métal glisse mal, s'allonge et se rompt ; si elle est trop faible, des plis peuvent se former.

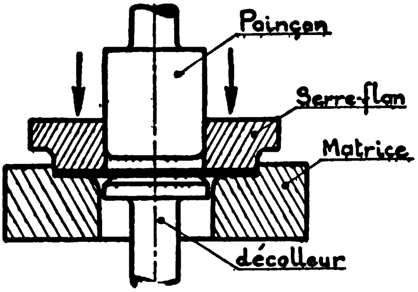



*Fig.* 5. — Schéma de principe d'une matrice avec serre-flan et décolleur.

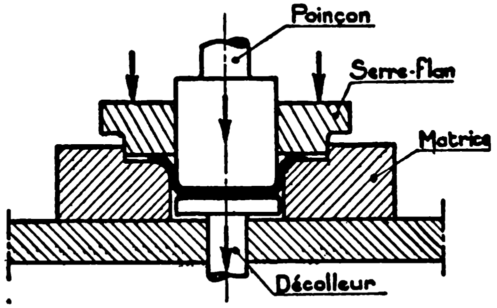



*Fig.* 6. — Action du serre-flan.

**Décolleur** : lorsque l'embouti ne peut être évacué par le dessous de la matrice, on prévoit un décolleur qui se met en action dès que le poinçon et le serre-flan sont relevés pour chasser la pièce (voir *fig.* 7).

En résumé, un outillage d'emboutissage comprend 4 parties : le poinçon, la matrice, le serre-flan et le décolleur.

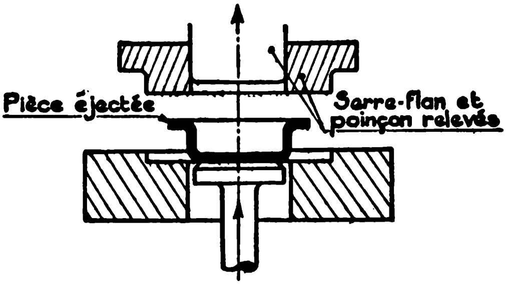



*Fig.* 7. — Action du décolleur.

## H. — Rognage des emboutis

En raison des différences d'épaisseur de la tôle, des imperfections des outillages ou des excédents du métal réservé, la hauteur de l'embouti n'est pas uniforme ou bien la largeur de la collerette ne correspond pas aux dimensions prévues. En général, on prévoit partout un excès de métal ; l'opération qui consiste à couper la tôle en excédent porte le nom de *rognage*. Elle se fait soit à la presse, dans des outils à découper pour la rectification des collerettes, soit au tour, au moyen d'outils à molette pour la mise à hauteur des emboutis cylindriques.

# I. — Différentes opérations d'emboutissage

Les emboutis peu profonds peuvent être exécutés en une seule opération. Mais lorsqu'on désire obtenir une profondeur plus grande, on doit réaliser successivement plusieurs opérations d'emboutissage ou d'étirage. Leur nombre dépend de la forme et des dimensions de la pièce, de la nature du métal, de son épaisseur, de l'amincissement produit par l'étirage.

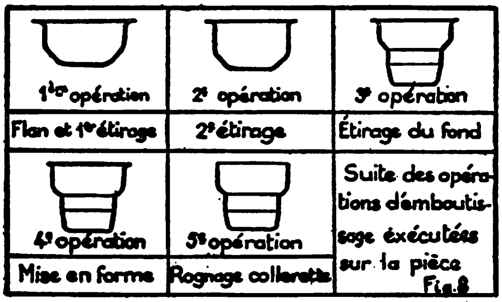



*Fig.* 8. — Gamme des opérations successives d'emboutissage.

La *figure* 8 représente les différentes phases de la fabrication d'un embouti. Il est à noter qu'entre chaque opération d'emboutissage un recuit doit être fait pour redonner au métal la malléabilité nécessaire.

# MACHINES D'EMBOUTISSAGE

Les machines utilisées dans les ateliers d'emboutissage sont des **presses hydrauliques** ou des **presses mécaniques.**

Les premières sont peu employées. On les réserve pour l'exécution des emboutis qui nécessitent de gros efforts : tôle épaisse, de grandes dimensions.

Les presses mécaniques, en raison de leur rapidité de fonctionnement, sont très répandues.

Elles comprennent les presses à simple effet, qui ne comportent qu'un coulisseau, et les presses à double effet, prévues avec deux coulisseaux, l'un pour le poinçon et l'autre pour le serre-flan.

## A. — Presses à simple effet

La *figure* 9 donne le schéma d'une presse à engrenage à bâti inclinable. Une bielle, qui reçoit son mouvement d'un arbre manivelle à excentrique, commande le coulisseau. Il est possible de faire varier le rayon de l'excentrique et, par suite, la course du coulisseau. La position de ce dernier, par rapport à la table, se règle au moyen d'une vis de fort diamètre : ainsi augmente ou diminue la longueur de la bielle.

A l'intérieur d'une rainure, prévue dans le coulisseau, se place une barre horizontale qui peut venir heurter, dans sa course ascendante, deux butées réglables C et C' fixées au bâti.

On verra par la suite que cette barre est encore susceptible d'être utilisée pour la commande du décolleur.

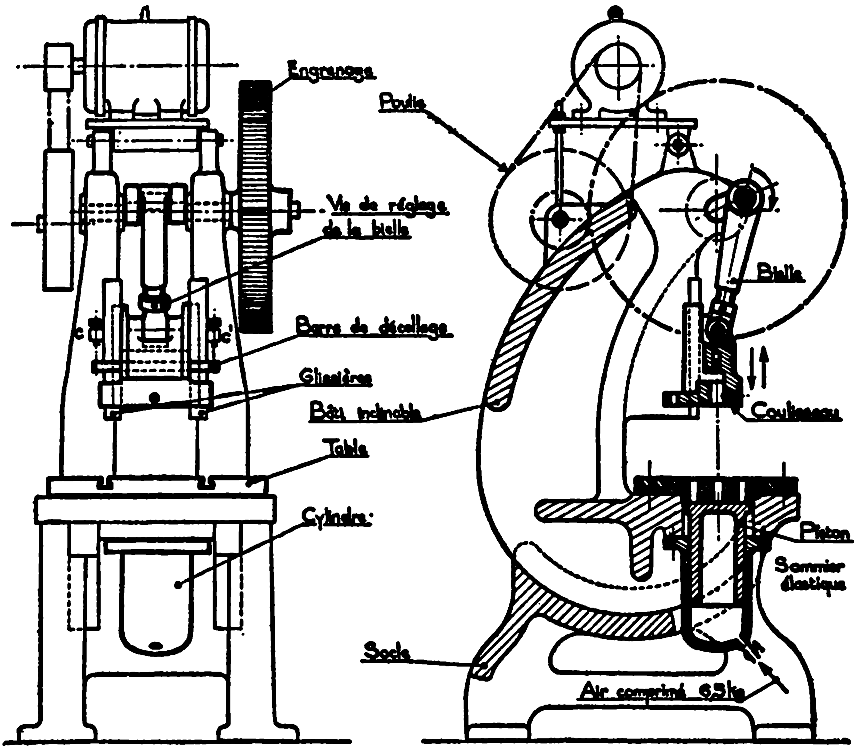



*Fig.* 9. — Schéma d'une presse mécanique à simple effet.

Sous la table on peut placer, soit un cylindre à air comprimé, dans lequel manœuvre un piston, soit un sommier élastique constitué par des ressorts ou un empilage de rondelles de caoutchouc. Ces dispositifs s'emploient pour la commande du serre-flan ou du décolleur.

Notons enfin, pour les petites presses, la possibilité d'incliner le bâti vers l'arrière afin de faciliter l'évacuation des pièces qui peuvent rouler ou glisser sur la table.

## B. — Presses à double effet

Elles comprennent les presses à commande par genouillères et les presses à commande par cames.

Nous nous bornerons à décrire ces dernières dont le principe se comprend facilement.

Le type de presse à cames, schématisé par la *figure* 10, comprend un coulisseau support de serre-flan qui sert de guide au coulisseau support de poinçon.

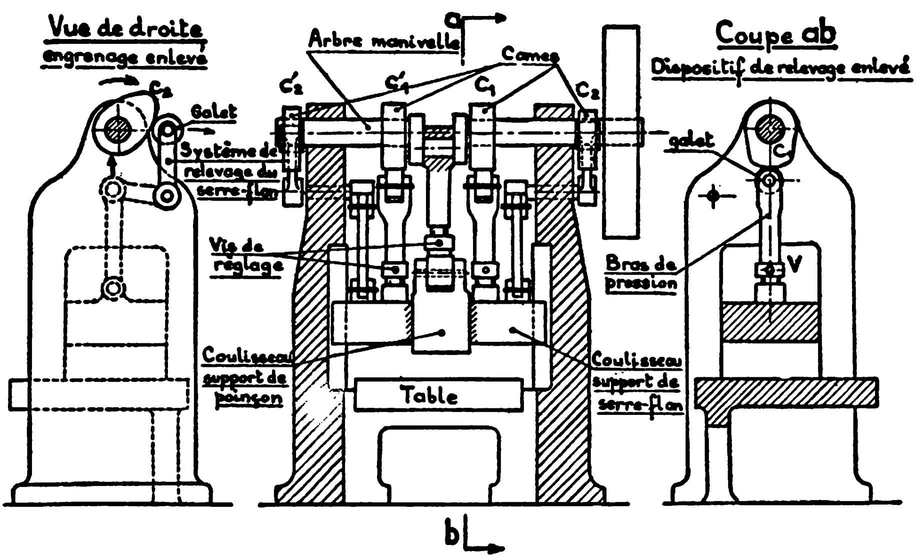



*Fig.* 10. — Schéma d'une presse mécanique à double effet (commandée par cames).

L'arbre vilebrequin commande directement le support de poinçon par l'intermédiaire d'une bielle. Les cames $C_1$ et $C'_1$, agissant sur deux bras verticaux munis de galets, assurent le mouvement de descente du support de serre-flan. La pression exercée peut être réglée au moyen des vis V. Un système de bielles, commandé par les cames $C_2$ et $C'_2$, relève le coulisseau serre-flan.

Les cames sont étudiées pour que le serre-flan reste immobile et exerce une pression constante sur la tôle pendant que le poinçon produit le travail d'emboutissage.

# OUTILS D'EMBOUTISSAGE

## A. — Outils d'emboutissage pour presses à simple effet

### 1° Outil direct.

La *figure* 11 représente un outillage dont le poinçon est monté directement sur le coulisseau de la presse. Le sommier pneumatique sert de commande au décolleur et la pression du serre-flan est obtenue par ressorts.

Au départ, le piston vient toucher le dessous de la presse tandis que le décolleur se trouve au niveau du drageoir. La face inférieure du serre-flan se trouve légèrement plus basse que le dessous du poinçon, dont l'action sur la tôle succède à celle du serre-flan. La pression exercée par le serre-flan augmente au fur et à mesure que s'exécute l'embouti.

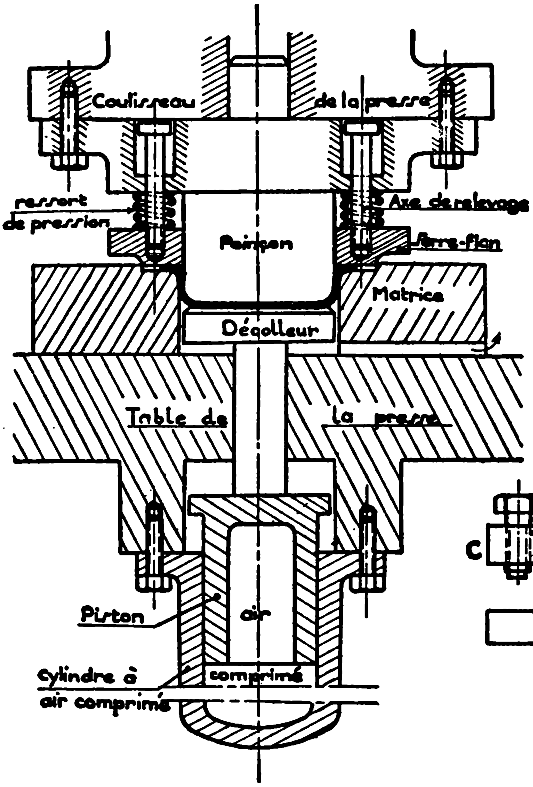



*Fig.* 11. — Schéma d'un outil direct en cours d'opération.

### 2° Outil inversé.

Les *figures* 12, 13, 14 représentent un outillage inversé avec matrice fixée au coulisseau. Il utilise, pour le décollage de l'embouti, la barre transversale ; la commande du serre-flan est assurée au moyen d'un matelas élastique constitué par des rondelles de caoutchouc.

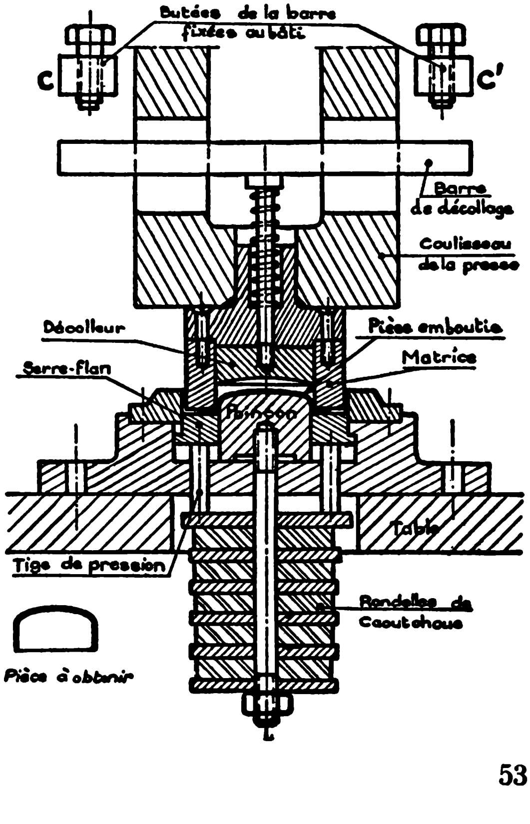



*Fig.* 12. — Schéma d'ensemble d'un outil inversé en cours d'opération. →

## B. — Outillage pour presses à double effet

Il est en général plus simple. La *figure* 15 représente l'outillage utilisé pour une première opération d'emboutissage. Le poinçon et le serre-flan se fixent sur chacun des coulisseaux de la presse. Sous la table, un dispositif pneumatique ou élastique assure la commande du décolleur (remarquer la forme tronconique de l'extrémité du poinçon).

La *figure* 16 représente l'outillage utilisé pour la deuxième opération.

La partie supérieure de la matrice a la forme de l'embouti réalisé précédemment. Le serre-flan tubulaire vient appuyer sur la partie intérieure tronconique de la pièce tandis que le poinçon, en descendant, produit l'étirage du métal.

Dans l'une et l'autre de ces opérations, la pression du décolleur demeurant constante, on peut obtenir des emboutis plus profonds qu'avec des outillages utilisés sur presses à simple effet.

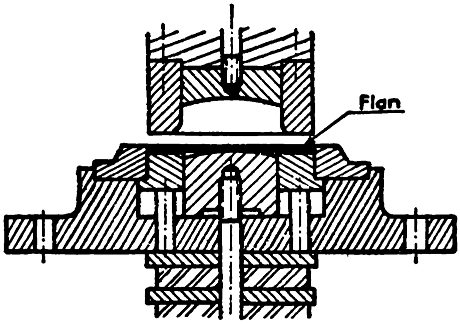



***Fig.* 13. — Schéma d'un outil inversé au début de l'opération.**

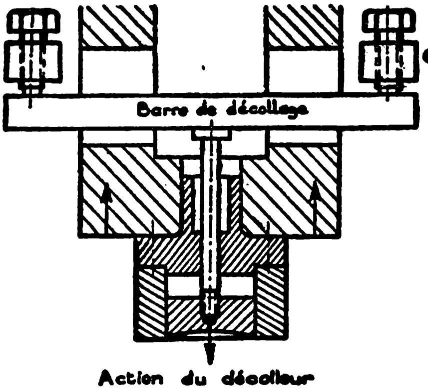



***Fig.* 14. — Schéma d'un outil inversé : action du décolleur.**

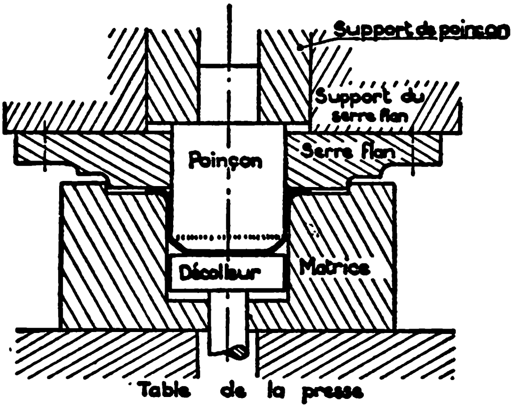



***Fig.* 15. — Schéma d'un outillage de presse à double effet pour 1re opération d'emboutissage.**

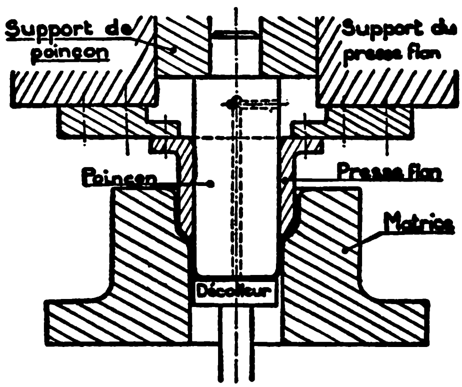



***Fig.* 16. — Schéma d'un outillage de presse à double effet pour 2e opération d'emboutissage.**

## C. — Exécution de pièces galbées

La *figure* 17 représente un outillage utilisé sur presses à double effet hydraulique pour l'exécution d'une pièce de forme sphérique.

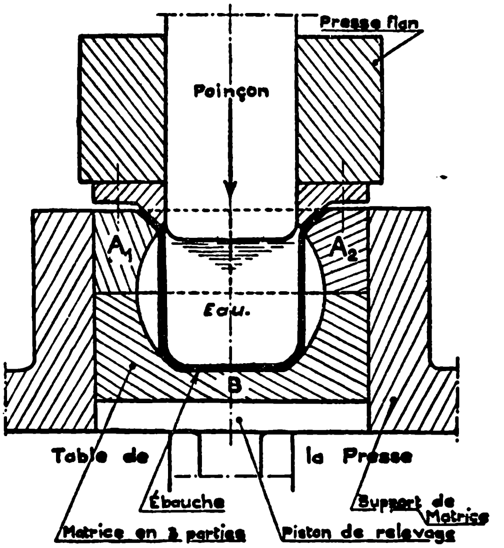



*Fig.* 17. — **Schéma d'un outillage pour exécution d'une pièce galbée et fonctionnant par pression hydraulique.**

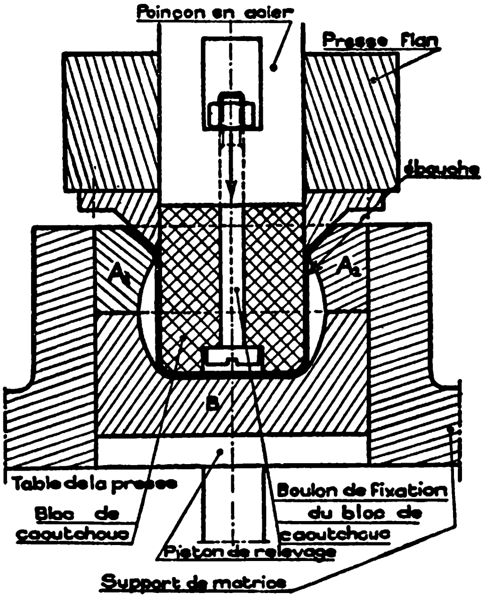
On a d'abord exécuté une ébauche cylindrique avec collerette tronconique. La matrice comprend trois parties $A_1$, $A_2$ et B qui, placées dans un support, reposent sur un piston commandé comme les décolleurs des précédents outillages.

On remplit d'eau l'ébauche et on la place dans la matrice. Le serre-flan descend, vient appuyer sur la collerette de l'ébauche, tandis que le piston, en descendant, comprime l'eau. Sous la pression de l'eau, l'embouti se déforme et prend la forme du creux de la matrice ; lorsque le poinçon est remonté, le piston soulève la matrice : on peut alors écarter les blocs $A_1$ et $A_2$ et retirer la pièce emboutie.

Il est à noter que l'on peut parvenir au même résultat avec une matrice complètement fermée, dans laquelle on fait arriver de l'eau maintenue sous pression au moyen d'un compresseur et d'un accumulateur hydraulique ; on évite ainsi l'emploi d'une presse.

Il est possible d'atteindre le même but en remplaçant par un bloc de caoutchouc (*fig.* 18) l'eau mise sous pression au moyen du poinçon de la presse. Sous l'action du poinçon, le caoutchouc se gonfle et applique l'ébauche contre les parois intérieures de la matrice.

*Fig.* 18. — **Schéma d'un outillage pour exécution d'une pièce galbée (fonctionnement par compression d'un bloc de caoutchouc).** ⟶



# DÉCOUPAGE ET POINÇONNAGE

## A. — Généralités sur le découpage et le poinçonnage

Le découpage est l'opération qui consiste à réaliser un flan dans une tôle plane, par cisaillement du métal.

Le poinçonnage est un découpage intérieur réalisé dans un flan.

Un outillage de découpage comporte un poinçon et une matrice en acier dur traité (trempe et revenu à basse température).

Le poinçon, placé par exemple à la partie supérieure, découpe, en descendant, un flan qui tombe à la partie inférieure de la matrice, d'où il peut être évacué par une ouverture prévue à cet effet (voir *fig.* 19 et 20). Lorsque le poinçon remonte, il tend à entraîner la tôle qui reste.

Aussi prévoit-on un dévêtisseur, plaque ajourée qui maintient la tôle en place pendant la remontée du poinçon.

Le cisaillement du métal impose un mouvement de translation, suivant F, du poinçon par rapport à la matrice. L'un de ces organes sera donc fixé sur la table de la presse, l'autre sur le coulisseau.

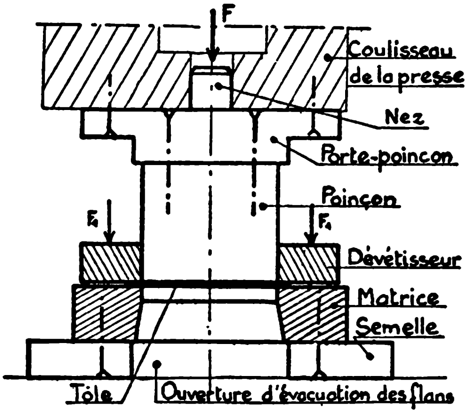



***Fig.* 19. — Schéma d'un outil de découpage au début de l'opération.**

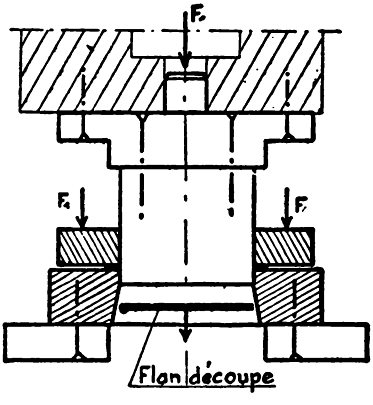



***Fig.* 20. — Schéma d'un outil de découpage en cours d'opération.**

L'outil représenté sur les *figures* 19 et 20 comprend :

— une matrice fixée sur la table de la presse par l'intermédiaire de semelles ou enclumes,

— un poinçon fixé sur le coulisseau par l'intermédiaire du porte-poinçon qui peut être exécuté en une ou plusieurs pièces.

Pour que le fonctionnement du coulisseau soit correct, il faut que la résultante des efforts de cisaillement soit située à l'intersection des plans médians des

glissières. Cette intersection est matérialisée sur le coulisseau par un alésage cylindrique dans lequel viendra s'ajuster un téton, également cylindrique, appelé *nez*, dont l'axe est confondu avec la résultante des efforts de découpage.

Si $l$ est la longueur du contour découpé exprimée en mm, $e$ l'épaisseur du métal en mm, $(Rr)_e$ la résistance à la rupture du métal découpé en N/mm², l'effort de découpage est donné par la relation

$$F \text{ en } N = S \times (Rr)_e = l \times e \times 0{,}8\ (Rr)_e.$$

## B. — Dimensions des poinçons et matrices. Formes des outils

Les dimensions du poinçon sont inférieures à celles de la matrice : $D < D_1$ (*fig.* 21). Le jeu est en général pris égal à : $D_1 - D = \frac{e}{20}$. Il est beaucoup plus petit que le jeu existant entre les glissières du coulisseau de la presse et du bâti. Il faut donc guider le poinçon pour être assuré qu'il pénétrera dans la matrice sans choc.

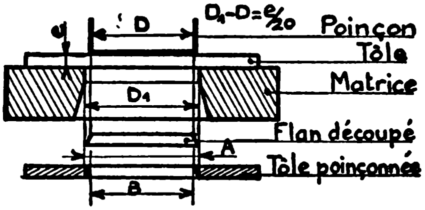



*Fig.* 21. — Forme et dimensions des : poinçon, matrice, flan découpé et tôle poinçonnée.

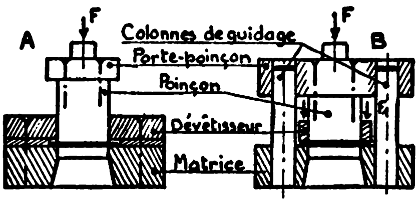



*Fig.* 22. — Schéma de principe du guidage du poinçon par rapport à la matrice. A : guidage par le dévêtisseur ; B : guidage par colonnes.

Deux solutions sont possibles (voir *fig.* 22).

*a*) Le dévêtisseur sert de guide du mouvement de translation. Il est, dans ce cas, fixé à la matrice. C'est le principe des outils couverts.

*b*) On prévoit deux colonnes de guidage emmanchées à force dans la matrice et coulissant juste dans le support de poinçon ou inversement. Le dévêtisseur doit dans ce cas exercer sur la tôle une pression

$$F_1 = 0{,}05\ F = 0{,}04\ l \times e \times (Rr)_e.$$

C'est le principe des outils à colonne.

La surface de cisaillement est légèrement oblique par rapport à la surface de la tôle.

Si on se propose d'obtenir un flan découpé, on donnera à la matrice la cote de la pièce $A = D_1$.

Si on se propose de poinçonner une tôle, la cote du poinçon doit être égale à la cote de l'ouverture $B = D$.

## C. — Outils couverts

Les outils couverts sont établis pour le découpage de pièces de petites dimensions. On utilise à cet effet des bandes de métal obtenues avec précision à la cisaille guillotine.

### 1° Outil parisien.

On désigne ainsi l'outil couvert prévu pour du découpage extérieur (voir *fig.* 23).

La contreplaque sert de dévêtisseur et de guide-poinçon. La distance intérieure entre les deux guides est supérieure de 1/10 de mm à la largeur de la bande de métal.

Le poinçon est assemblé et rivé dans le porte-poinçon.

Une plaque d'appui en tôle bleue d'acier dur évite le matage du porte-nez qui est en acier demi-dur ou en fonte.

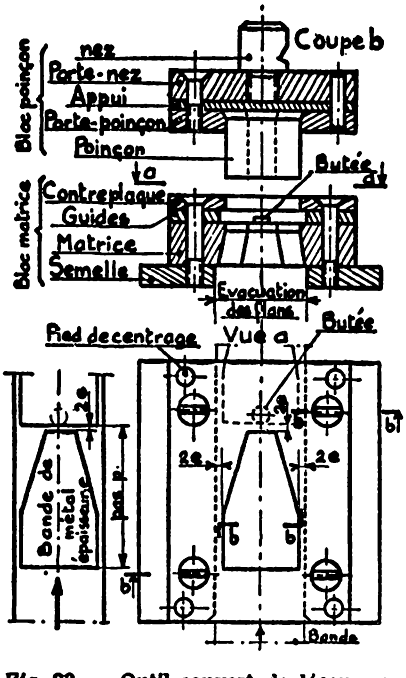



*Fig.* 23. — Outil couvert de découpage : outil parisien.

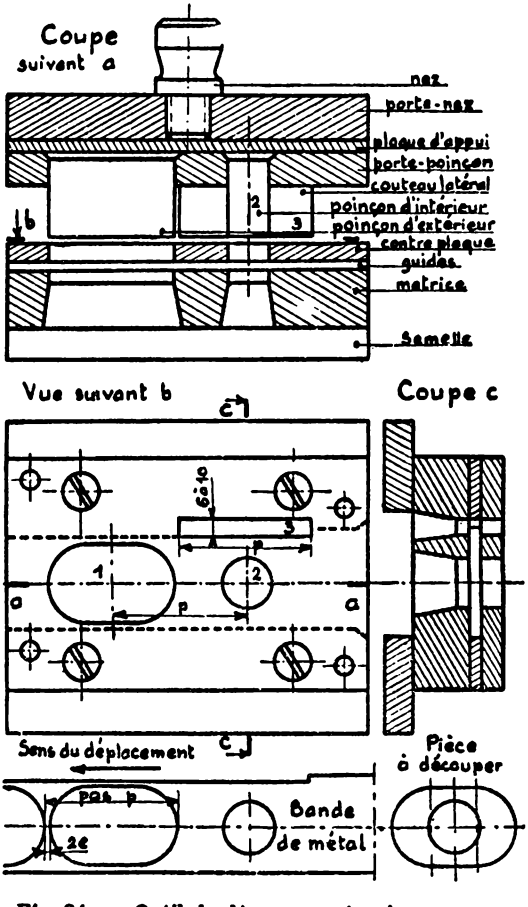



*Fig.* 24. — Outil de découpage et poinçonnage : outil à suivre à couteau latéral.

L'assemblage du bloc poinçon et du bloc matrice se fait au moyen de vis et de pieds de centrage.

Une butée plate permet de repérer la position de la tôle après chaque découpe : l'ouvrier fait glisser la tôle soulevée par la remontée du poinçon et met la butée en contact avec la partie arrière découpée.

### 2° Outil à suivre.

L'outil à suivre (*fig.* 24) est un outil couvert qui permet de réaliser des pièces découpées et poinçonnées. Il comporte deux outils. L'outil de découpage 1 détache la pièce qui vient d'être poinçonnée par l'outil 2.

Le déplacement de la bande à découper peut être réglé soit par butée plate, comme dans l'outil parisien, soit en utilisant un couteau latéral qui découpe sur le côté de la bande une longueur de métal égale au pas d'avancement.

## D. — Outils à colonne

Le guidage du poinçon par rapport à la matrice est assuré au moyen de deux colonnes rectifiées et comportant des rainures de graissage.

Pour obtenir un bon guidage, il faut donner aux colonnes un grand diamètre et une longueur d'ajustement minimum égale au diamètre.

Les outils conçus pour le découpage de grandes pièces peuvent avoir des poinçons et des matrices constitués par des éléments de petites dimensions assemblés sur des supports résistants (*fig.* 25).

Les outils à colonne comprennent des outils de découpage directs et inversés, des outils de découpage et poinçonnage.

### 1° Outils directs.

Le bloc poinçon est fixé au coulisseau de la presse et le bloc matrice sur la table.

La *figure* 25 représente cet outil en fin d'opération. Le dévêtisseur est fixé au support de poinçon ; l'effort d'extraction de la bande de tôle du poinçon est assuré au moyen de ressorts.

La tôle découpée traverse la matrice.

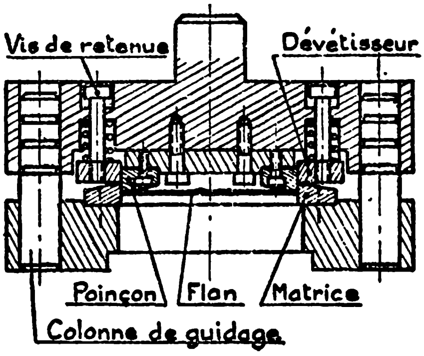



*Fig.* 25. — Schéma d'un outil de découpage à colonnes de guidage à action directe. ——→

## 2° Outils inversés, encore appelés outils suisses.

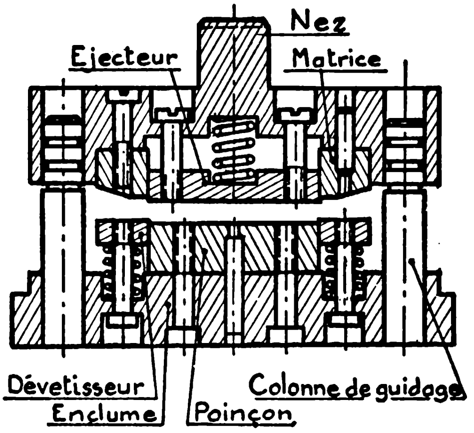



*Fig.* 26. — Schéma d'un outil de découpage à colonnes de guidage inverse : outil suisse.

Le bloc poinçon est fixé sur la table de la presse tandis que le bloc matrice est rendu solidaire du coulisseau. La *figure* 26 représente l'outil ouvert.

Le flan découpé se trouve introduit à l'intérieur de la matrice; il faut, pour l'en sortir, un éjecteur à ressort. Ainsi, après découpage, les pièces reprennent leur place dans la bande ; un simple choc suffit à les faire tomber.

Les dispositifs de guidage de bande et de butée sont fixés sur le dévêtisseur. Ils sont constitués par des doigts montés sur ressorts, de façon à s'éclipser sous la pression de la matrice.

## 3° Outils de poinçonnage et découpage.

Ils comprennent les éléments de l'outil direct pour le poinçonnage et les éléments de l'outil inversé pour le découpage.

La *figure* 27 représente un outil de petite dimension.

La partie enlevée est évacuée par le dessous de la matrice.

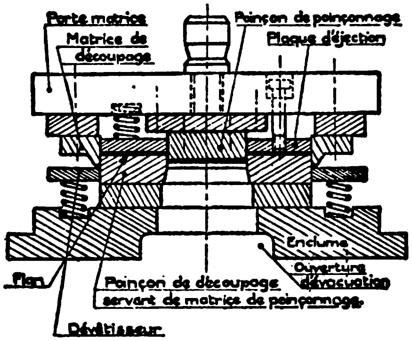



*Fig.* 27. — Schéma d'un outil à découper et poinçonner.

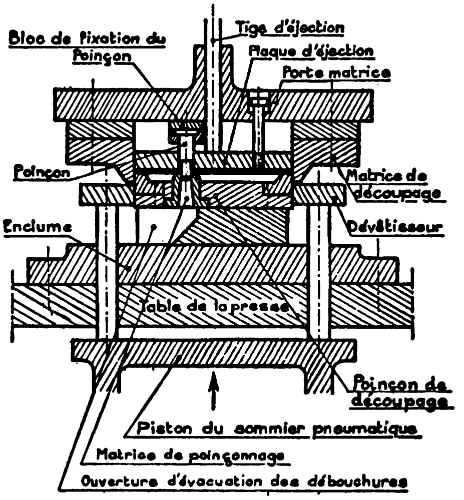



*Fig.* 28. — Schéma d'un outil à découper et poinçonner avec dévêtisseur commandé par sommier pneumatique.

La *figure* 28 représente un outil de plus grandes dimensions. La matrice de poinçonnage est rapportée sur le porte-poinçon de découpage ; le dévêtisseur est commandé par le sommier pneumatique et la plaque d'éjection par la barre de décollage.

On remarquera dans les deux cas que, le poinçon étant légèrement en retrait, le découpage est terminé avant que la deuxième opération ne commence. Il est évident que des colonnes de guidage, non représentées sur les *figures* 27 et 28, sont à prévoir.

## E. — Outil combiné de découpage et d'emboutissage

Fréquemment le découpage du flan s'effectue en même temps que la première passe d'emboutissage.

La *figure* 29 représente l'outil combiné de découpage et d'emboutissage.

On retrouve sur ces outils les éléments déjà rencontrés sur les outils simples. Là encore, des colonnes de guidage sont à prévoir puisqu'il y a découpage.

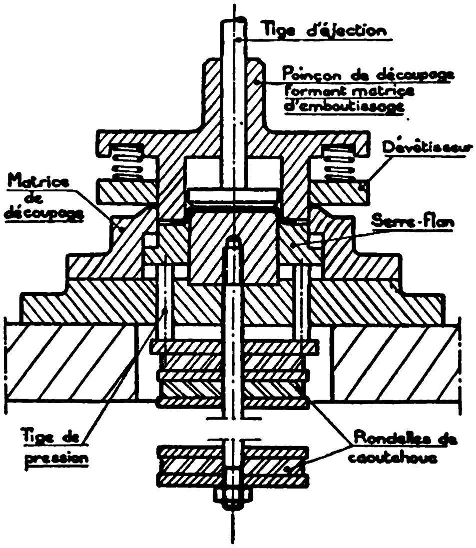



*Fig.* 29. — Schéma d'un outil de découpage et d'emboutissage. ⟶

◇

# Différents procédés d'assemblage

Les principaux procédés d'assemblage permanent des pièces métalliques sont :

1° **L'agrafage**, qui s'applique surtout aux tôles minces. Les bords des tôles sont repliés encastrés l'un dans l'autre, puis serrés au marteau ou à la machine.

2° **Le rivetage**, qui consiste à réunir deux pièces par serrage au moyen de rivets écrasés au marteau.

3° **Le soudage**, union intime des bords de deux pièces. Le soudage peut être autogène ou hétérogène.

a) ***Soudage autogène.***

Il constitue un assemblage homogène dont le joint présente les mêmes propriétés chimiques, physiques et mécaniques que les pièces.

Il s'obtient :

1° **Par fusion** intime des bords, avec ou sans addition de métal.

Pour produire le soudage, il est nécessaire de faire appel à une source de chaleur qui peut être notamment :

a) *La combustion de l'acétylène à la sortie d'un chalumeau* : soudage oxyacétylénique.
b) *L'arc électrique.*
c) *L'arc électrique en atmosphère d'argon* : soudage à l'argon.

2° **Par pression.**

Il requiert le chauffage du métal à température élevée (blanc soudant) et une action mécanique sur les pièces mises en contact (martelage ou pression).

On utilise comme source de chaleur :

a) *Le feu de forge* : soudage à la forge.
b) *L'effet Joule* résultant du passage du courant dans les pièces (soudage par résistance) :
en bout ou par refoulement (voir forgeage) ;
par rapprochement ou par étincelles ;
par recouvrement ou par points.

**b) *Soudage hétérogène.***

Le soudage est dit hétérogène lorsque le joint est constitué par un métal différent de celui des pièces à assembler, et déposé par fusion.

Il peut s'appliquer :

*a*) A l'assemblage de pièces disposées côte à côte : *soudo-brasage.* Le soudage est obtenu par fusion, au chalumeau oxyacétylénique, de laitons, bronzes ou alliages spéciaux.

*b*) A l'assemblage de pièces comportant des joints emboîtés : *brasage.*

Le brasage est dit *fort* lorsqu'il s'exécute avec du cuivre, du laiton, un alliage à base d'argent portés à la fusion par la flamme d'une lampe à souder, ou par un feu de forge.

Le brasage porte le nom de *soudage tendre* lorsqu'il utilise un alliage de plomb et d'étain porté à la fusion par la flamme d'une lampe à souder ou par un fer à souder.

## L'AGRAFAGE

L'agrafage est un procédé d'assemblage réservé aux tôles minces (jusqu'à 7 ou 8/10). Il permet d'assembler deux tôles soit dans le prolongement l'une de l'autre, soit disposées perpendiculairement (agrafage de fonds de boîtes).

Il peut être *droit*, c'est-à-dire perpendiculaire aux tôles, ou *replié* contre les tôles. Il est *simple* si l'une des tôles ne présente qu'un pli (l'autre en ayant deux), ou *double* si une tôle est repliée deux fois et l'autre trois (voir *fig.* 1).

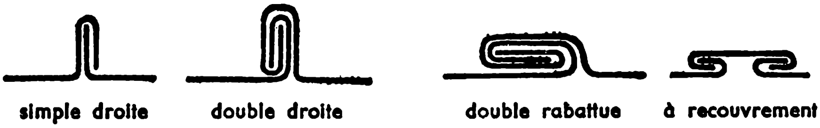



*Fig.* 1. — Agrafures.

Pour rendre l'agrafure étanche, il suffit d'introduire un joint qui se trouve écrasé entre les plis.

On emploie l'agrafage pour l'exécution :

— de boîtes en fer blanc, en laiton, en cuivre, en aluminium destinées à contenir des produits alimentaires ou des ingrédients divers ;

— de tuyaux utilisés en fumisterie.

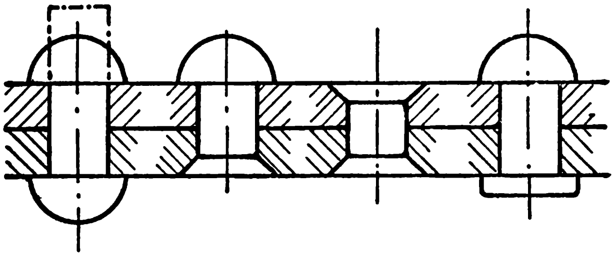
On exécute les agrafures à la main, au moyen des outils courants du chaudronnier et d'outils particuliers à main. On les réalise également au moyen de machines, souvent automatiques, lorsqu'il s'agit de fabrications en série.

# LE RIVETAGE

## A. — Généralités

Le rivetage est un procédé d'assemblage des tôles et des barres d'acier profilées. Les rivets se fabriquent en général avec le même métal que les pièces assemblées.

La tête des rivets est ronde, fraisée ou plate ; les rivets à tête plate sont utilisés pour l'assemblage des tôles minces (voir *fig.* 2).



**Rivet tête ronde** **Rivets tête fraisée** **Rivet tête plate**

***Fig.* 2. — Forme des têtes de rivets.**

Dans les constructions aéronautiques, on utilise des rivets tubulaires afin d'obtenir des assemblages plus légers. Leur extrémité peut aussi être écrasée ronde, fraisée ou plate.

Pendant le rivetage, les rivets à tête ronde sont posés sur une contre-bouterolle. Une bouterolle sert à former une tête ronde.

Avant de commencer une opération de rivetage, il faut assurer le contact parfait des tôles à l'aide d'un presse-tôle (ou « tire-rivet »), sur lequel on frappe avec un marteau (voir *fig.* 3).

Les pièces à river doivent être percées ou poinçonnées à un diamètre légèrement supérieur à celui des rivets. Le rivetage s'exécute à froid pour les rivets de petit diamètre ($\Phi < 6$ mm) et à chaud pour les autres.

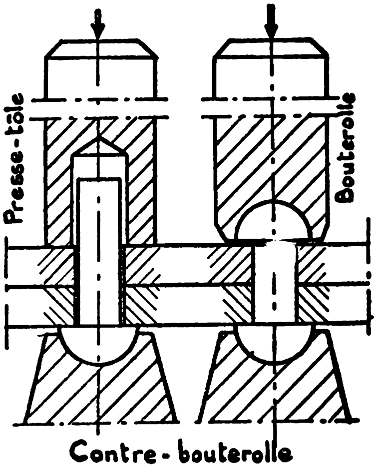



***Fig.* 3. — Outillage pour pose de rivets à tête ronde.** ⟶

La pose des rivets s'effectue :

1° **A la main.** Le rivet est écrasé d'abord au marteau à main ou au marteau pneumatique. Puis la tête est forgée à l'aide d'une bouterolle. Souvent

la partie active du marteau pneumatique sert de bouterolle.

Le métal en excès forme une bavure qui doit être régulièrement répartie.

2° **A la machine.** Les machines à river agissent le plus souvent par pression. Le bord des tôles est joint au moyen d'un presseur (voir *fig.* 4).

Il existe des machines à river portatives ou fixes, le plus souvent à commande pneumatique ou hydraulique.

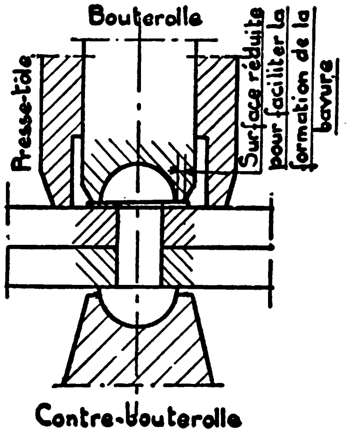



*Fig.* 4. — Schéma d'un outillage pour machine à river. ——→

## B. — Préparation des tôles et des profilés : le poinçonnage

Les trous indispensables au passage des rivets peuvent être percés lorsque le diamètre prévu pour le rivet est trop petit par rapport à l'épaisseur du métal :

$$d < 1{,}2\ e \text{ pour l'acier doux.}$$

Dans le cas contraire, il est plus économique de les obtenir par poinçonnage.

Le poinçonnage est une opération qui permet de réaliser des trous par cisaillement du métal au moyen d'un poinçon et d'une matrice en acier dur trempé (voir *fig.* 4 *bis*).

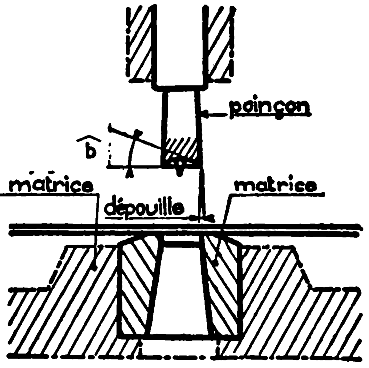



*Fig.* 4 *bis.* — Poinçonnage.

Le poinçon, de section circulaire, présente un angle de dépouille de 3° environ et quelquefois un angle de dégagement de 10°.

Une petite pointe ou « mouche », prévue à la partie inférieure du poinçon et suivant son axe, permet de centrer la pièce. Celle-ci est déplacée jusqu'à ce que la « mouche » coïncide avec le coup de pointeau donné à l'emplacement du trou à percer.

La matrice est alésée cylindrique sur une longueur de 2 ou 3 mm et à un diamètre supérieur de 1 ou $\frac{2}{10}$ de mm à celui du poinçon ; l'alésage devient ensuite coni-

que pour faciliter l'évacuation de la débouchure. Le poinçonnage s'effectue au moyen de machines à commande mécanique ou hydraulique.

Si $e$ mm est l'épaisseur de la pièce et $d$ mm le diamètre du poinçon, le diamètre minimum de poinçonnage est donné par la relation :

$$d \geqslant e \times \frac{(R_r)_e}{400},$$

$(R_r)_e$ étant la résistance à la rupture par traction du métal à poinçonner, en N/mm².

On a $d \geqslant 1{,}7\,e$ pour l'acier demi-dur et $d \geqslant 1{,}2\,e$ pour l'acier doux.

## C. — Résistance des rivures

Les rivets posés à chaud travaillent rarement au cisaillement. Au refroidissement, le rivet exerce par ses têtes une forte pression sur les pièces assemblées, tandis que son diamètre va en diminuant des extrémités vers le milieu. La résistance de la rivure résulte de l'adhérence des pièces en contact. On compte pour les rivets en acier une force d'adhérence par rivet de :

$$F\ \text{kg} = S\ \text{mm}^2 \times 150\ \text{N/mm}^2$$

S étant la section du rivet en mm².

## D. — Étanchéité des rivures

Les rivures peuvent être rendues étanches par interposition de joints appropriés ou par matage du bord de la tôle d'épaisseur forte ou moyenne qui doit être coupée en biseau.

# LE SOUDAGE

## A. — Soudages autogènes

### 1° Soudage autogène oxyacétylénique.

#### a) *Source de chaleur.*

La fusion des bords de la pièce et de la baguette de métal d'apport s'obtient par la flamme résultant de la combustion d'un mélange d'acétylène et d'oxygène. Les deux gaz sont mélangés, en proportion convenable, dans un chalumeau et le mélange gazeux est enflammé à la sortie de l'appareil.

La *figure* 5 représente, en coupe, un *chalumeau à basse pression*. La composition du mélange se règle par deux robinets $R_1$ et $R_2$ et le débit de l'appareil par une *buse* en cuivre à *orifice calibré*. Une série de 6 buses est livrée avec chaque appareil, ce qui permet, par exemple, les débits suivants : 25, 50, 75, 100, 150, 250 litres de gaz à l'heure.

La flamme oxyacétylénique normale comprend deux zones : le *dard* qui constitue la zone chaude et le *panache*, ou flamme secondaire, de couleur moins vive (*fig.* 6).

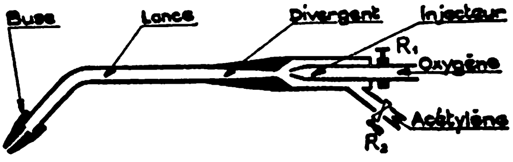



*Fig.* 5. — Chalumeau oxyacétylénique.

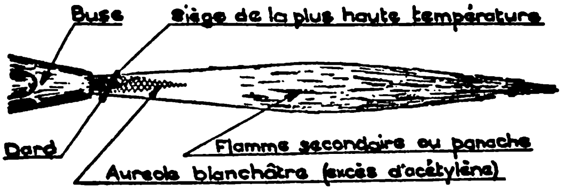



*Fig.* 6. — Schéma de la flamme d'un chalumeau.

Si le chalumeau est bien réglé, le dard doit être aussi long que possible (5 à 6 mm pour un bec de 100 litres). Lorsqu'il y a un excès d'acétylène, une auréole blanchâtre apparaît en prolongement du dard. Un excès d'oxygène raccourcit et amincit le dard. Le réglage s'opère en manœuvrant les robinets $R_1$ et $R_2$, et toujours en partant d'un *excès* d'acétylène.

## b) *Installation d'un poste de soudage.*

### 1° Alimentation en oxygène.

L'oxygène, fourni par liquéfaction de l'air, est livré dans des *bouteilles* en acier où il est comprimé à la pression de 150 kgf/cm² (ou 1500 N/cm²). La capacité de la bouteille s'exprime par un nombre de m³ (0,5 à 7,5) qui correspond au volume occupé par le gaz lorsqu'il est à la pression atmosphérique et à la température de 15° C. Un robinet étudié spécialement et qui doit être manœuvré avec précaution obture la bouteille.

La pression d'utilisation de l'oxygène étant de 1 à 3 kgf/cm² (ou 10 à 30 N/cm²), il faut placer un *détendeur* entre la bouteille et le chalumeau. Cet appareil, qui se monte directement sur le robinet de la bouteille, comporte deux *manomètres* donnant la pression du gaz, l'un *dans la bouteille* et l'autre *après détente*. L'ensemble porte le nom de *manodétendeur*. Un volant permet de régler la pression d'utilisation du gaz.

### 2° Alimentation en acétylène.

L'acétylène est un carbure d'hydrogène, de formule chimique : $C_2H_2$. Il est obtenu en mettant de l'*eau* en présence de *carbure de calcium* (formule $C_2Ca$).

La réaction s'effectue suivant l'équation chimique :

$$C_2Ca + 2\,H_2O = Ca\,(OH)_2 + C_2H_2 \nearrow.$$

Il y a donc production *à la fois* d'acétylène et de chaux éteinte.

L'utilisateur peut fabriquer lui-même l'acétylène à partir du carbure de calcium dans des appareils spéciaux appelés *générateurs*. Il peut aussi employer le gaz dissous livré dans des bouteilles métalliques.

A) Générateurs d'acétylène.

Ce sont des appareils permettant de produire et d'emmagasiner l'acétylène provenant de la décomposition du carbure de calcium mis au contact de l'eau. Il existe trois types de générateurs :

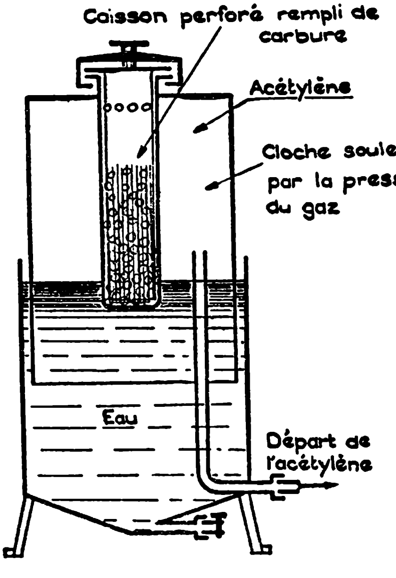



*Fig.* 7. — Générateur d'acétylène à contact.

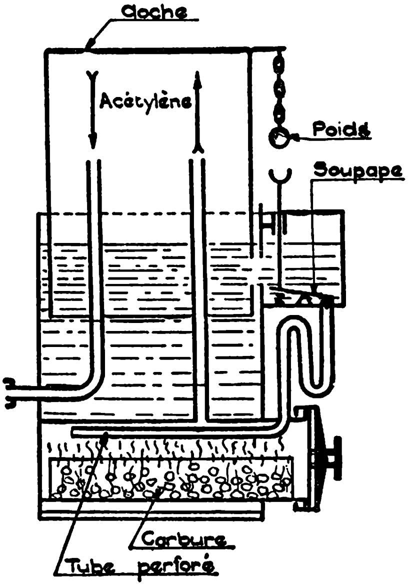



*Fig.* 8. — Générateur d'acétylène à chute d'eau sur le carbure.

a) *Appareils à contact* (fig. 7).

Le carbure, que contient un caisson perforé, plonge dans l'eau. La pression de l'acétylène se règle automatiquement, car le gaz en pression soulève la cloche et supprime le contact du carbure avec l'eau.

b) *Appareils à chute d'eau sur le carbure* (fig. 8).

Lorsque la pression du gaz diminue, le mouvement descendant de la cloche assure l'ouverture d'une soupape et l'eau tombe sur le carbure à travers un tube perforé. Ces appareils, qui fonctionnent bien, permettent un remplissage en carbure et un nettoyage faciles.

c) *Appareils à chute de carbure dans l'eau* (fig. 9).

En descendant, la cloche mobile commande, par l'intermédiaire d'un levier coudé, le clapet assurant la chute du carbure. Ces générateurs nécessitent l'emploi de carbure en grains de 2 à 7 mm. Ils sont d'une grande souplesse de débit en raison de la parfaite décomposition du carbure granulé ; mais ils peuvent devenir dangereux si le clapet vient à se coincer : tout le carbure tombe dans l'eau.

Ces trois types d'appareils produisent du gaz acétylène à faible pression : 15 à 20 gf par cm², soit 0,15 à 0,2 N/cm².

Il existe des postes, généralement du type *à contact*, qui fournissent de l'acétylène à la pression de 1,5 kgf/cm², soit 15 N/cm².

Contrôlés avant la mise en service, ils sont munis d'une soupape de sûreté et conviennent très bien comme générateurs portatifs.

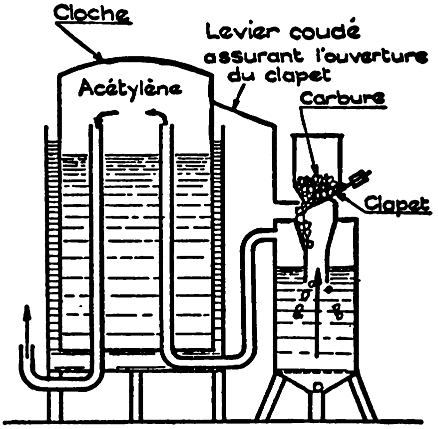



*Fig.* 9. — Générateur à chute de carbure dans l'eau.

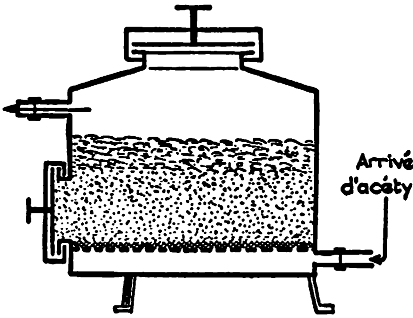



*Fig.* 10. — Schéma d'un épurateur d'acétylène.

d) *Épuration de l'acétylène.*

Le gaz produit par les générateurs contient toujours des impuretés (hydrogène phosphoré et hydrogène sulfuré). Si l'acétylène n'était pas débarrassé de ces impuretés, le phosphore et le soufre, au moment du soudage, seraient absorbés par le métal qui deviendrait moins résistant.

On épure l'acétylène en lui faisant traverser une couche de matières capables de fixer les impuretés par réaction chimique (voir *fig.* 10).

B) Acétylène dissous.

L'acétylène fabriqué dans des usines spécialisées ne peut, sans danger, être comprimé à haute pression pour être livré comme l'oxygène dans des bouteilles en acier. Mais ses propriétés explosives sont considérablement diminuées s'il est dissous dans l'acétone à une pression de 15 kgf/cm²,

soit 150 $N/cm^2$. Pour écarter tout danger, on le fait absorber par de l'acétone imbibant une matière poreuse qui remplit une bouteille en acier étiré. Ces bouteilles, de même aspect que les bouteilles utilisées pour l'oxygène, sont obturées par un robinet spécial. La pression d'utilisation du gaz étant de 15 à 50 $gf/cm^2$ (soit 0,15 à 0,5 $N/cm^2$), il est nécessaire de prévoir un manodétendeur.

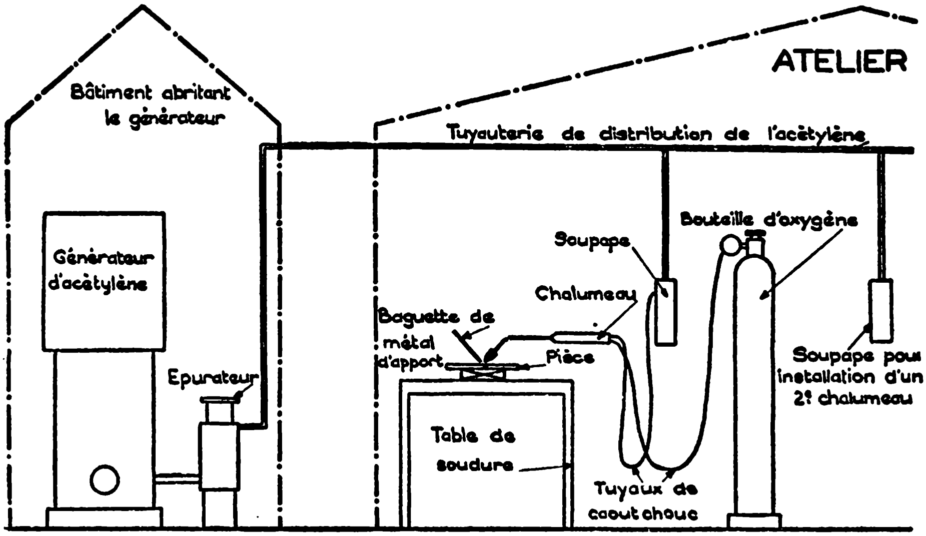


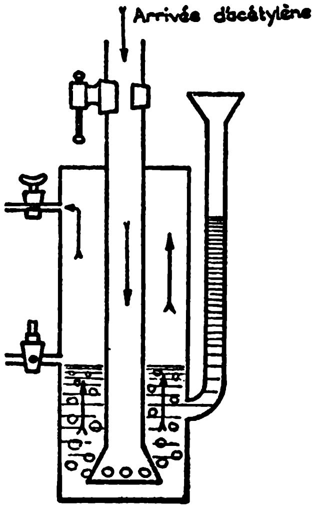

*Fig.* 11. — **Schéma d'installation d'un poste de soudage à basse pression.**

C) Installation de postes de soudage a basse pression.

La *figure* 11 fournit la représentation schématique d'une installation de plusieurs postes de soudage à basse pression. L'acétylène est produit par un générateur disposé dans un local situé hors de l'atelier afin d'éviter toute émanation de gaz dangereuse pour les ouvriers. Sur son trajet, on place une soupape dont le but est d'éviter tout retour d'oxygène de la bouteille vers le générateur, retour causé par un mauvais fonctionnement du chalumeau.

La *figure* 12 représente une soupape hydraulique en fonctionnement normal.

*Fig.* 12. — **Schéma d'une soupape en fonctionnement normal.** →



Lorsqu'un retour d'oxygène se produit, la pression de ce gaz chasse l'eau qui est évacuée à l'extérieur. Le liquide, remontant dans le tube d'arrivée d'acétylène, s'oppose ainsi au mélange des deux gaz (*fig.* 13).

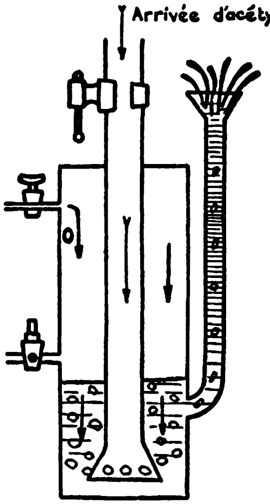



*Fig.* 13. — Schéma d'une soupape lorsqu'un retour d'oxygène se produit.

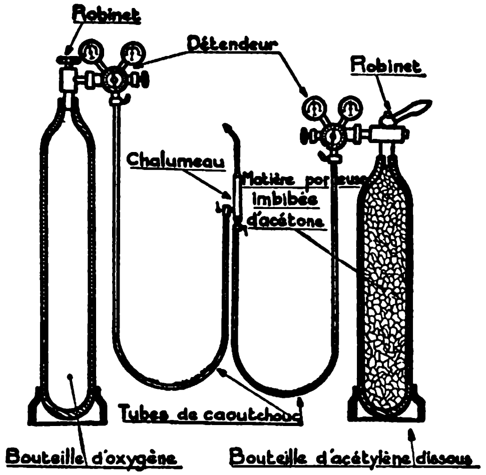



*Fig.* 14. — Schéma d'installation d'un poste de soudage à haute pression.

D) Installation de postes de soudage a haute pression.

On utilise une bouteille d'oxygène et une bouteille d'acétylène dissous (*fig.* 14).

## c) *Technique du soudage.*

### 1° Règles relatives à l'exécution du soudage.

On peut, par soudage, assembler des pièces situées dans un même plan (*soudages bord à bord*) ou disposées dans des plans obliques (*soudages d'angle extérieur* ou *intérieur*).

Les soudures ne doivent jamais travailler à la *flexion*, à la *torsion* ou au *choc*, et ce principe guide le choix de la disposition des lignes de soudage.

Les bords à souder, très propres, doivent présenter une forme géométrique, obtenue par cisaillage, meulage ou usinage. A partir d'une certaine épaisseur (environ 5 mm), des chanfreins sont à prévoir (voir *fig.* 15 et 15 *bis*).

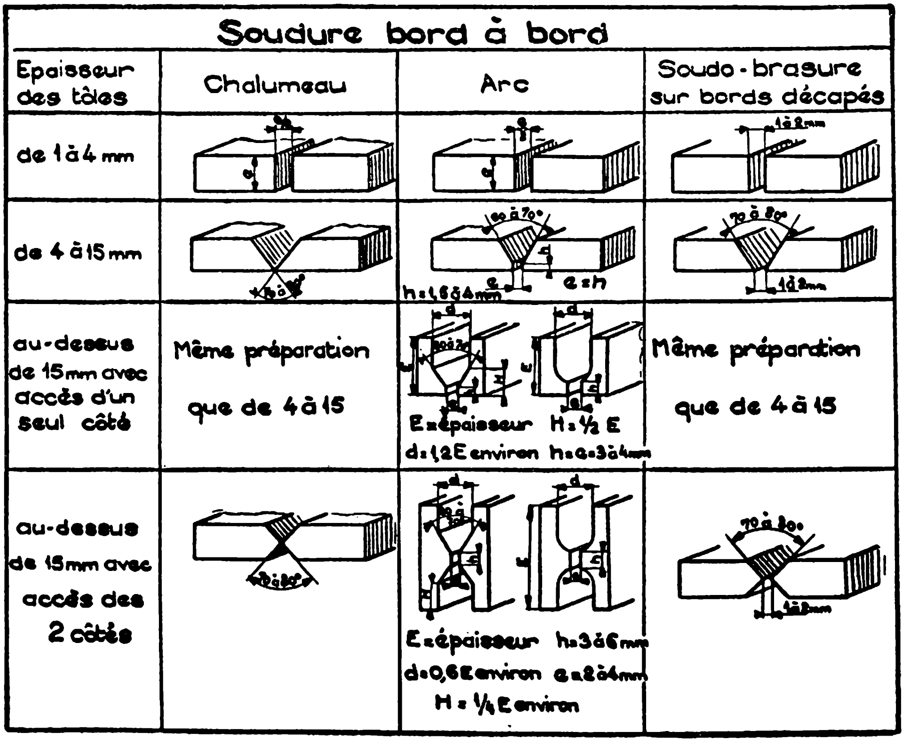



*Fig.* **15. — Formes des bords à souder bout à bout.**

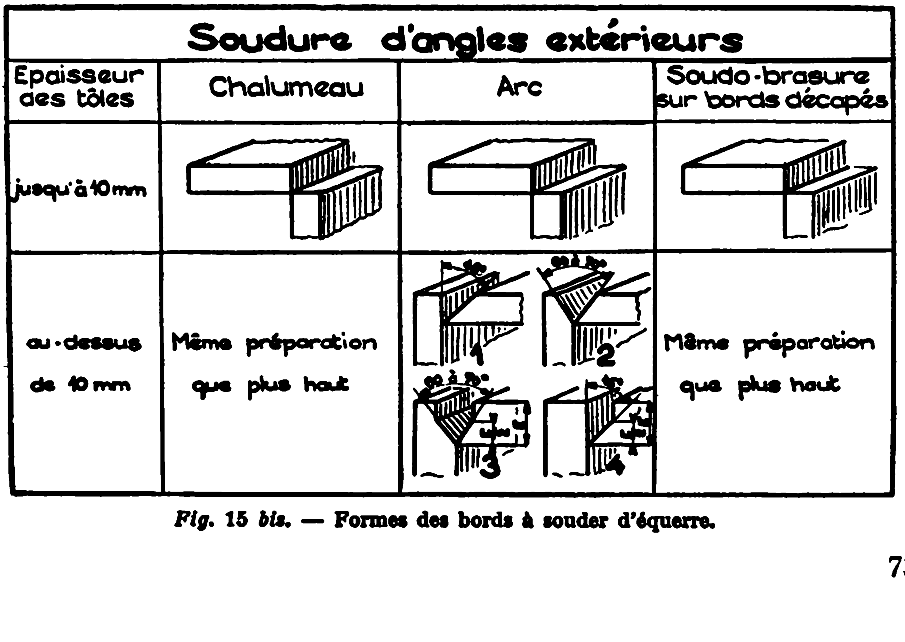
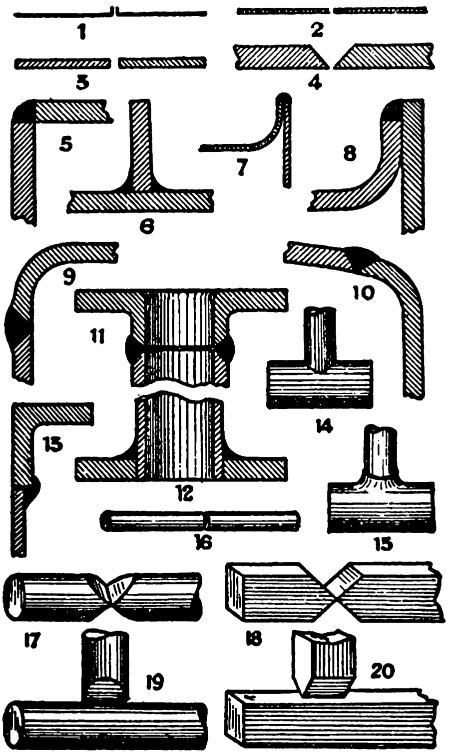



***Fig.* 15 *bis.* — Formes des bords à souder d'équerre.**




1. — Soudage sur bords relevés pour tôle de 1/2 à 1 mm.
2. — Soudage sur bords sans biseau pour tôle de 1 à 3 mm.
3. — Soudage bords écartés de 1 à 2 mm pour tôles de 3 à 5 mm.
4. — Chanfreinage (90°) pour tôles d'au moins 5 mm.
5. — Soudage d'angle pour récipient sans pression.
6. — Soudage d'angle simple ou double.
7. — Soudage de fond pour récipients en tôle mince 3 mm.
8. — Soudage de fond pour tôle épaisse.
9. — Soudage d'un fond sur une virole de récipient à pression.
10. — Soudage très préférable à 5.
11-12. — Brides sur tuyauterie.
13. — Soudage tôle sur cornière.
14-15. — Jonctions cylindriques dont 15 est très préférable.
16. — Jonction de fils et barres jusqu'à 15 mm de diamètre.
17. — Soudage des barres de plus de 15 mm.
18. — Soudage pour barres carrées.
19. — Soudage rectangulaire de barres épaisses.
20. — Soudage pour barres carrées.

*Fig.* 15 *ter*. — Tableau des différents types de soudages.

La *figure* 15 *ter* représente une série de pièces soudées.

Il y a certaines précautions à prendre pour tenir compte des phénomènes de dilatation et de retrait qui accompagnent le chauffage et le refroidissement du métal.

C'est ainsi qu'on sera amené à *pointer*, avant de réaliser le cordon de soudure, des tôles plates ou des viroles cylindriques (*fig.* 16 et 17).

Pour lutter contre le retrait de la soudure d'assemblage de deux viroles, on évasera au préalable les bords à souder (*fig.* 18 et 19, 20 et 21).

Pour la même raison, on cintre légèrement un tube sur lequel on veut souder une dérivation (*fig.* 22 et 23).

Enfin, pour l'exécution des pièces prismatiques, on préfère le soudage en pleine tôle au soudage d'angle qui entraîne la déformation du fond, impossible à reprendre par planage (*fig.* 24 et 25).

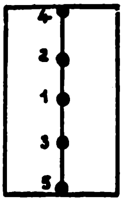



*Fig.* 16. — Pointage pour soudage de tôle.

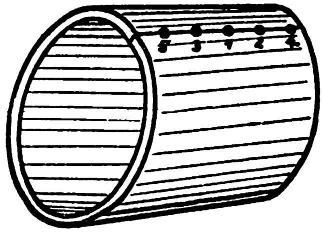



*Fig.* 17. — Pointage pour soudage de virole.

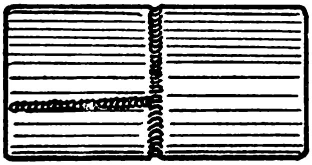


*Fig.* 18. — Déformation des pièces cylindriques soudées sans préparation.

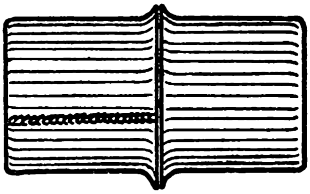


*Fig.* 19. — Préparation des pièces cylindriques à souder bout à bout.

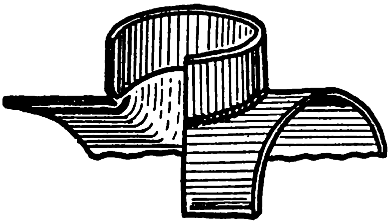


*Fig.* 20. — Déformation résultant du soudage de viroles sans préparation.

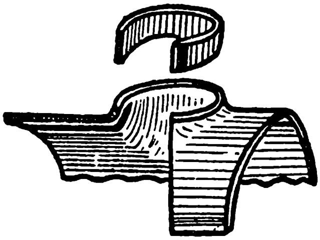


*Fig.* 21. — Préparation des pièces avant soudage.

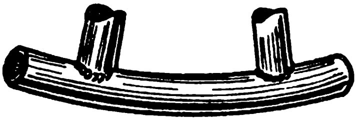


*Fig.* 22. — Déformation résultant du soudage de tuyaux sans préparation.

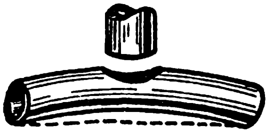


*Fig.* 23. — Préparation des pièces pour soudage d'un piquage.

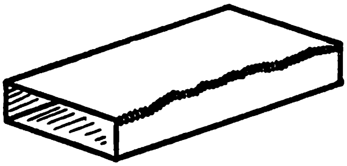


*Fig.* 24. — Soudage d'angle : à éviter.

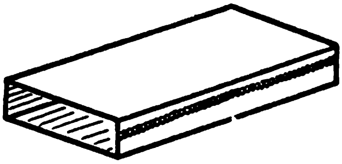


*Fig.* 25. — Soudage en pleine tôle : à recommander.

2° **Exécution manuelle des soudages.**

Les soudages doivent pouvoir s'exécuter dans la position où se trouvent les pièces à assembler. Ils peuvent se réaliser en une ou plusieurs passes, suivant l'épaisseur du métal. Le diamètre de la baguette du métal et le choix de la buse du chalumeau varient avec la nature du métal, son épaisseur et le genre de soudage.

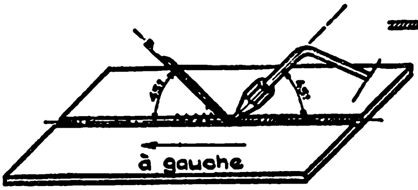



*Fig.* 26. — **Soudage à gauche.**

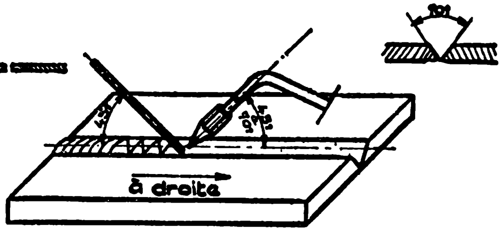



*Fig.* 27. — **Soudage à droite.**

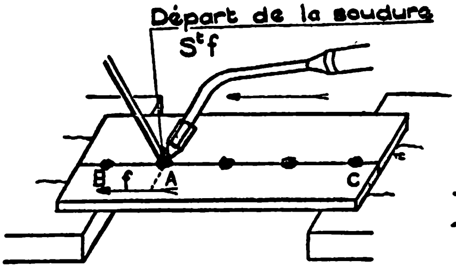



*Fig.* 28. — **Pointage des soudures.**

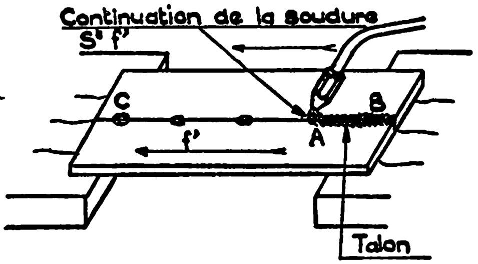



*Fig.* 29. — **Exécution d'un cordon de soudure.**

On distingue :

a) *Soudage horizontal*, qui peut être à gauche (*fig.* 26) ou à droite (*fig.* 27) suivant le sens de déplacement du chalumeau. Pour éviter la formation de tensions pouvant amener la cassure du métal, il ne faut jamais commencer le soudage en pleine tôle, mais procéder comme il est indiqué sur les *figures* 28 et 29.

Quand il est nécessaire de faire deux passes, on doit effectuer les deux cordons alternativement dans le fond et à la surface sur une longueur de 60 mm environ (*fig.* 30).

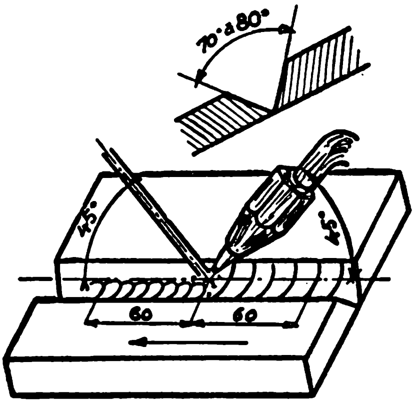



*Fig.* 30. — **Soudage en deux passes.**

b) *Soudage montant.* La *figure* 31 montre la tenue du chalumeau.

c) *Soudage en corniche* ou soudage suivant une ligne horizontale tracée sur une paroi verticale. C'est le soudage le plus difficile à réaliser (*fig.* 32).

d) *Soudage au plafond.* Il présente une difficulté certaine en raison de la position fatigante imposée à l'ouvrier.

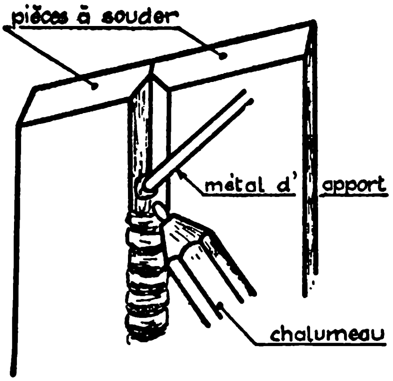



*Fig.* 31. — Soudage montant.

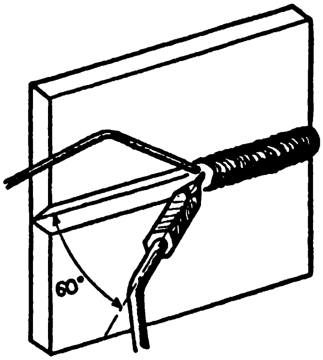



*Fig.* 32. — Soudage en corniche.

## d) *Soudage des principaux métaux.*

1° **Aciers.** Le soudage des aciers extra-doux, doux et demi-doux s'effectue en utilisant comme métal d'apport un acier extra-doux, vendu en baguette ou en couronne.

La soudabilité de l'acier diminue avec sa teneur en carbone. Pratiquement les aciers demi-durs et durs ne se soudent pas.

2° **Fonte.** La fonte grise peut parfaitement se souder en utilisant des baguettes de fonte grise à haute teneur en silicium et une poudre spéciale (*flux décapant*) destinée à éliminer l'oxyde de fer formé pendant l'opération. Comme la fonte est un alliage fragile, les pièces à souder nécessitent un préchauffage partiel ou total. En outre, toutes précautions seront prises pour éviter les tensions résultant du retrait et des dilatations.

3° **Aluminium.** L'aluminium se soude en utilisant des baguettes d'aluminium et une poudre spéciale destinée à éliminer l'oxyde d'aluminium infusible en constante formation sous le chalumeau.

Le soudage des alliages d'aluminium s'effectue de la même façon, mais en utilisant des baguettes de composition ou de propriétés générales identiques à celles du métal à souder.

Notons enfin que l'on peut souder les alliages de magnésium, le cuivre, les laitons, les bronzes, le zinc, le plomb, etc.

## e) *Oxy-coupage.*

1° **Principe.** On appelle oxy-coupage le découpage des aciers à l'aide d'un chalumeau spécial (*fig.* 33), à jet d'oxygène, déplacé suivant la ligne à sectionner.

L'opération, commencée sur le bord de la pièce, comprend d'abord un chauffage du métal au moyen d'une flamme normale. Lorsque le métal est porté au rouge vif, on envoie un jet d'oxygène. Le fer s'oxyde rapidement et l'oxyde, très fusible, coule. La combustion du fer dégageant de la chaleur, la réaction peut continuer, à condition toutefois de fournir des calories supplémentaires par la combustion d'un peu d'acétylène.

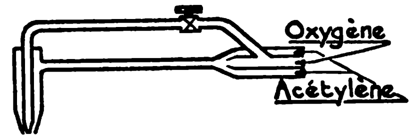



*Fig.* 33. — Schéma d'un chalumeau coupeur à jets concentriques.

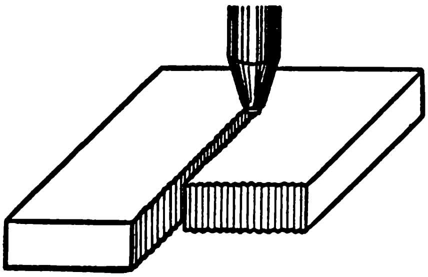


*Fig.* 34. — Schéma d'une coupe bien faite.

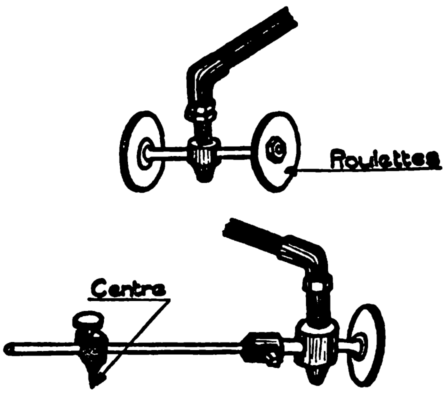



*Fig.* 35. — Guides pour chalumeaux coupeurs.

2° **Chalumeaux coupeurs.** Ils sont constitués par un chalumeau ordinaire à buse annulaire au centre de laquelle est placé le tube d'arrivée du jet d'oxygène nécessaire à la combustion du fer. Chaque tuyauterie d'arrivée de gaz est commandée par un robinet.

Une bonne coupe doit se présenter sous la forme d'une saignée très étroite, avec des stries fines et régulières (*fig.* 34). Pour obtenir des lignes de coupe nettes, on utilise avantageusement des guides à roulette pouvant se déplacer le long de règles, de guides à compas, etc. (*fig.* 35).

# 7° Soudage à l'arc électrique.

## a) *Généralités.*

C'est un procédé de soudage dans lequel un arc électrique, créé entre l'électrode et les pièces à souder, fournit la chaleur nécessaire à la fusion du métal.

L'électrode, constituée par une baguette de métal, et les pièces à souder sont réunies aux bornes d'une source de courant continu ou alternatif. Si on met en contact l'électrode avec la pièce, puis si on l'écarte légèrement, un arc électrique jaillit ; il en résulte un dégagement de chaleur important ; la température de l'arc atteignant environ 3 000°, la partie de la pièce en contact avec l'arc et l'extrémité de l'électrode entrent en fusion. Le soudage continu peut être réalisé par le déplacement lent de l'électrode suivant *f* (*fig.* 36).

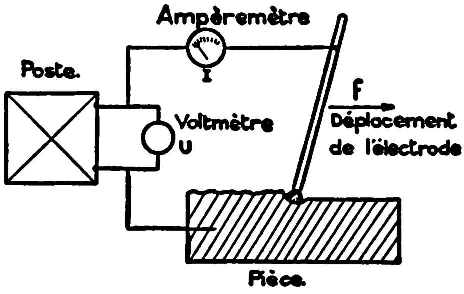



*Fig.* 36. — Schéma de principe d'une installation de soudage à l'arc. ⟶

**b) *Pour entretenir un arc électrique de soudage, un poste de soudage est indispensable.***

La tension à vide, nécessaire pour l'amorçage de l'arc, varie de 50 à 80 volts environ. Elle est mesurée par le voltmètre lorsque l'électrode est éloignée de la pièce ; l'intensité est évidemment nulle, car il n'y a aucun passage de courant.

Lorsque l'arc est amorcé, un courant de 100 à 150 ampères circule et l'on enregistre une tension U comprise entre 18 et 30 volts. Il est bien évident que la tension et l'intensité varient avec la longueur de l'arc que l'ouvrier ne peut maintenir rigoureusement constante. D'autre part, l'intensité doit pouvoir être réglée en fonction du diamètre de l'électrode.

Il est donc apparu nécessaire de prévoir un *poste de soudage* qui a pour rôle :

*a*) de régler la tension à la valeur nécessaire pour la formation correcte de l'arc ;

*b*) de régler et de stabiliser l'intensité absorbée ;

*c*) d'amortir les perturbations apportées au réseau par les brusques variations de régime dans le travail : arrêts fréquents, amorçages de l'arc avec mise en court-circuit de la source de courant quand l'électrode touche la pièce, etc.

**c) *Principaux types de postes.***

L'arc électrique peut être créé et entretenu par du courant alternatif ou du courant continu.

La grande majorité des ateliers étant équipée avec du courant alternatif triphasé ou biphasé à 220 V, il y a lieu de transformer ce courant en courant alternatif de plus faible tension ou en courant continu.

1° **Postes de soudage à courant alternatif** (*fig.* 37).

Le type le plus répandu est le poste à transformateur auto-régulateur, essentiellement constitué par un transformateur qui réalise à lui seul l'abaissement de la tension, la stabilisation et le réglage de l'intensité du courant de soudage. Le primaire du transformateur se branche directement sur une phase du réseau à 220 V par l'intermédiaire d'appareils de protection (fusibles ou disjoncteur à minimum de tension et maximum d'intensité). Sur le circuit secondaire du transformateur sont disposés les organes de stabilisation et de réglage de l'intensité. L'une des sorties du secondaire est réunie à l'électrode par l'intermédiaire d'un câble et d'une pince spéciale à manche isolé ; l'autre est connectée aux pièces par l'intermédiaire d'un câble de masse relié soit à la table métallique de soudage sur laquelle on a posé les pièces, soit directement lorsqu'elles sont volumineuses.

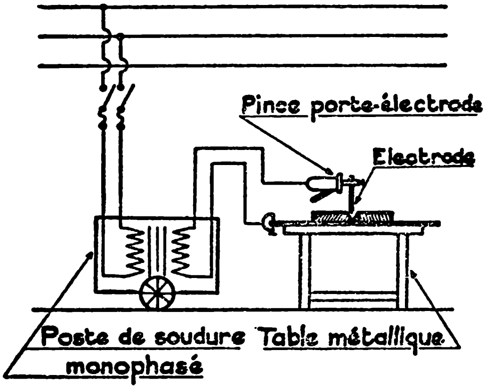


*Fig.* 37. — Schéma de l'installation d'un poste statique pour soudage à l'arc.

Le réglage de l'intensité peut être :

a) *Discontinu.* Il est obtenu au moyen de prises sur les enroulements : dispositifs à fiches ou à commutateur ;

b) *Continu.* Ce dispositif de réglage comporte alors une self dont on peut faire varier la valeur en déplaçant, au moyen d'un volant, le noyau magnétique de la bobine ;

c) *Discontinu avec dispositif de réglage continu entre deux valeurs de l'intensité.* Il est réalisé en combinant les systèmes de prises de courant et de self variable.

Ces postes sont appelés *postes statiques* parce qu'il n'y a pas d'organe de transformation du courant qui soit en mouvement. Ils sont généralement montés sur un petit chariot afin de faciliter leur déplacement dans les ateliers ou sur les chantiers.

2° **Postes de soudage à courant continu.**

Certains travaux de soudage nécessitent l'emploi de courant continu. On a dû créer des postes permettant de transformer le courant alternatif en courant continu. Deux solutions ont été adoptées :

a) *Postes rotatifs* (fig. 38). Ils se composent d'un générateur à courant continu entraîné par un moteur à courant alternatif.

Le générateur est généralement une dynamo autorégulatrice qui fournit le courant à la tension désirée, assure la stabilité de l'arc et permet le réglage de l'intensité par décalage des balais ou rhéostat d'excitation.

L'une des bornes de la machine est reliée à la pince porte-électrode et l'autre à la pièce.

Le moteur est asynchrone triphasé ou biphasé branché sur le réseau par l'intermédiaire d'un disjoncteur.

L'ensemble moteur-génératrice peut constituer un groupe monobloc utilisé à poste fixe ou pouvant être monté sur un chariot.

b) *Postes redresseurs de courant.* Ils comportent un transformateur triphasé ou biphasé qui alimente un redresseur de courant, généralement du type oxymétal.

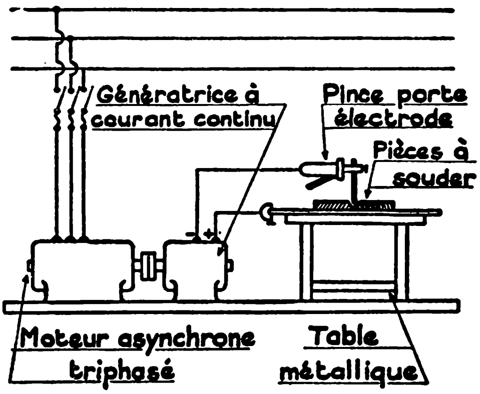



*Fig.* 38. — Schéma de l'installation d'un poste rotatif à courant continu pour soudage à l'arc.

## d) *Les électrodes.*

D'une façon générale, on choisit une électrode qui déposera un métal dont les propriétés mécaniques, physiques et chimiques se rapprochent le plus possible de celles du métal à souder. Ainsi, pour souder de l'acier doux ou de l'acier inoxydable, on prend des électrodes de même nuance. Cependant, il est possible, pour réduire l'importance du cordon de soudure, d'utiliser des électrodes d'une résistance mécanique supérieure à celle du métal à souder.

La longueur des électrodes est fonction de leurs diamètres ; elle varie de 150 mm pour un diamètre Ø = 1, à 450 mm pour des diamètres Ø = 3,25 à 8.

Elles sont recouvertes d'une gaine de produits appropriés, appelée *enrobage*. Seule une extrémité, celle qui doit s'emmancher dans la pince, est dénudée sur une longueur de 2 à 3 cm.

Une électrode nue ne permettrait pas l'amorçage de l'arc en courant continu et n'assurerait pas l'entretien de l'arc avec du courant alternatif.

Le rôle de l'enrobage est triple : *électrique*, *métallurgique* et *mécanique*.

1° **Au point de vue électrique**, l'enrobage a permis d'utiliser le courant alternatif ; quelle que soit la nature du courant, il facilite l'amorçage de l'arc et le maintien stable, rendant ainsi possible, sans grande difficulté, le travail de soudage.

2° **Son action métallurgique** permet d'éviter l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air sur le métal en fusion, action qui aurait pour résultat la dénaturation du métal et la formation de nitrures métalliques, constituants excessivement fragiles.

L'enrobage joue :

a) *Un rôle passif de protection* par l'émission de vapeurs qui, entourant l'arc, s'opposent à l'action de l'air sur le métal en fusion.

b) *Un rôle actif améliorant*, par introduction, dans le métal, des éléments destinés à remplacer ceux qui disparaissent et à améliorer les caractéristiques du cordon de soudure.

Il faut noter, en outre, qu'après fusion les éléments de l'enrobage se déposent sous forme de laitier à la surface de la soudure, empêchant ainsi l'action oxydante de l'air sur le métal solidifié à haute température.

3° **L'action mécanique** de l'enrobage se traduit par un guidage mécanique de l'arc à l'extrémité de l'électrode. Le métal fondant le premier l'enrobage constitue une véritable gaine autour de l'arc (*fig.* 39).

De l'épaisseur de l'enrobage dépend également la forme du cordon de soudure (*fig.* 40).

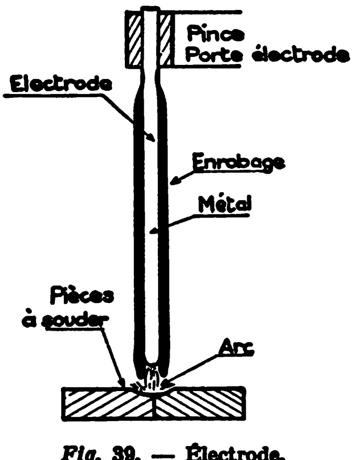



***Fig.* 39. — Électrode. Production de l'arc.**

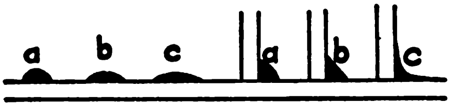



***Fig.* 40. — Cordons obtenus avec électrodes dont l'enrobage varie d'épaisseur.**
***a*: enrobage mince ; *b*: enrobage moyen ; *c*: enrobage épais.**

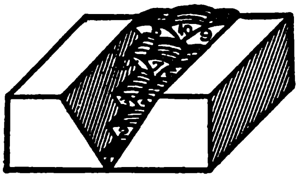


***Fig.* 41. — Cordon de soudure exécuté en plusieurs passes.**

## e) *Champ d'application du soudage à l'arc.*

Le soudage à l'arc ne peut remplacer le soudage oxy-acétylénique, mais il le complète heureusement.

Les perfectionnements apportés en matière de soudage à l'arc ont étendu considérablement son champ d'application. On réalise couramment, en **tôlerie et chaudronnerie**, des soudages parfaitement étanches sur tôles d'acier doux, d'aciers spéciaux, d'acier inoxydable. L'épaisseur minimum des tôles à souder paraît être d'environ 1 mm.

Le soudage à l'arc, ne produisant qu'une chauffe locale, a trouvé de nombreuses applications dans l'assemblage de pièces de fortes épaisseurs ou d'épaisseurs inégales. Les soudures en **constructions navales**, en **charpente** et en **menuiserie**

métallique tendent à se substituer aux rivures. De plus en plus, on fabrique des bâtis de machines (presses, cisailles, etc.) avec des éléments laminés (tôles épaisses et profilées) soudés à l'arc. Ils sont beaucoup plus résistants aux efforts brusques et aux chocs que les bâtis en acier coulé. De même, en mécanique, on remplace de plus en plus les *montages d'usinage* réalisés avec des éléments en fonte par des montages que constituent des éléments soudés à l'arc. On réalise ainsi de sérieuses économies de temps et d'argent. Il faut enfin noter les possibilités aussi multiples que variées offertes par le soudage à l'arc appliqué à la réparation d'organes de machines cassés ou usés.

En particulier, on peut effectuer le soudage à l'arc de la fonte et même celui de plaques d'acier sur la fonte.

Le soudage à l'arc des alliages légers n'est pas encore au point; on ne peut pour l'instant les assembler que par soudage oxy-acétylénique.

### f) *Méthodes d'exécution des soudures.*

Elles sont à peu près identiques à celles du soudage au chalumeau. On réalise des soudures *bord à bord*, *avec* ou *sans chanfrein*, *à plat*, *montantes*, *en corniche*, *en plafond* et des *soudures par recouvrement*, *en angle intérieur*, dans les mêmes positions. Lorsqu'on soude des pièces épaisses, il y a lieu de prévoir, sur le bord des parties à assembler, un chanfrein pour faire plusieurs passes dans l'ordre indiqué par la *figure* 41. Les passes centrales 7 et 10 se feront après les passes latérales 5 et 6 d'une part, 8 et 9 d'autre part.

### g) *Machines automatiques de soudage à l'arc.*

Des machines automatiques et semi-automatiques de soudage à l'arc ont été réalisées pour les travaux de grande série. Leurs organes mécaniques se substituent à l'ouvrier pour l'exécution des mouvements indispensables : contact de l'électrode avec la pièce, puis écartement brusque pour amorçage de l'arc, mouvement de descente permettant de suivre la fusion de l'électrode en conservant à l'arc une longueur constante. Sur les machines entièrement automatiques, l'avancement de l'électrode sur la ligne de soudure est soumis à une vitesse régulière, et, le cas échéant, des petits mouvements permettent d'effectuer des passes larges.

On a substitué, à l'électrode métallique enrobée, un fil électrode enroulé sur une bobine.

La grosse difficulté, qui consiste à amener le courant à une distance assez voisine de l'extrémité, a été résolue de diverses manières, notamment par :

a) *fil électrode enrobé*, recouvert d'un feuillard ;

b) *fil électrode nu*, dont une extrémité est noyée dans une traînée de sable décapant ;

c) *fil électrode à produits intérieurs* ;

d) *fil électrode enrobé*, recouvert d'un feuillard électriquement en contact avec l'âme par une spirale métallique ;
e) *emploi d'électrodes courantes avec changeur automatique* ;
f) *emploi d'électrodes de charbon* pour soudage de pièces minces sans métal d'apport.

**Les machines à souder.**

Elles comportent :

a) *une tête de soudage* qui est chargée de distribuer le métal d'apport et de conduire l'arc ;
b) *un bâti* permettant le déplacement relatif de la tête par rapport à la pièce ;
c) *une source de courant*, c'est-à-dire le poste de soudage.

Ces machines, très coûteuses, permettent d'obtenir une vitesse d'exécution beaucoup plus grande que par le travail à la main. Elles n'offrent un intérêt que pour des travaux de grande série, par exemple la fabrication des tubes soudés.

### h) *Hygiène et sécurité des soudeurs à l'arc.*

Le soudage à l'arc présente certains risques résultant :

a) *des radiations* émises par l'arc électrique ;
b) *de la pollution de l'atmosphère* ;
c) *des projections du métal* en fusion ;
d) *de l'emploi du courant électrique.*

L'arc électrique émet des radiations lumineuses vives, qui fatiguent les yeux, et des radiations ultraviolettes et infrarouges qui provoquent la conjonctivite, affection assez grave et très douloureuse. D'autre part, ces mêmes radiations, surtout les infrarouges, produisent des brûlures de la peau. Le soudeur doit donc protéger les parties de son corps directement en contact avec ces rayons (ses yeux, sa figure et ses mains), utiliser un masque ou un casque muni de verres filtrants spéciaux et porter des gants de cuir. Très souvent, le soudeur travaille dans une cabine fermée, afin d'éviter que l'arc incommode les autres ouvriers de l'atelier. Il faut que ces cabines de soudage soient ventilées, pour éviter au soudeur les troubles pulmonaires toxiques et physiologiques résultant de la pollution de l'air par l'arc électrique. En atmosphère confinée, l'air se trouverait assez vite vicié par les vapeurs résultant de la fusion de l'enrobage qui est constitué par des substances chimiques complexes, et par la formation de bioxyde d'azote résultant de l'union, à la température de l'arc, de l'oxygène et de l'azote de l'air.

Des gants et un tablier de cuir assurent la protection du soudeur contre les projections de métal en fusion.

Si l'installation d'arrivée du courant est correctement faite, si le poste est mis à la terre, et si le soudeur travaille toujours avec ses gants, tout danger résultant de l'utilisation du courant électrique est écarté.

## 3° Soudage à l'arc électrique en atmosphère d'argon.

### a) *Principe.*

La source de chaleur est un arc électrique jaillissant dans une atmosphère d'argon entre une électrode de tungstène et les pièces à souder. L'atmosphère d'argon est neutre, c'est-à-dire sans effet sur le métal en fusion et sur l'électrode ; elle protège contre l'oxydation la zone de soudage, rendant inutile l'utilisation d'un flux décapant et permettant d'employer les baguettes de métal d'apport destinées au soudage oxyacétylénique.

On peut, par ce procédé, souder tous les métaux.

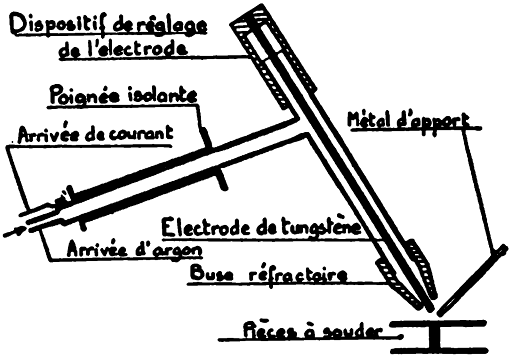



*Fig.* 42. — Schéma d'une torche manuelle fonctionnant à l'argon.

### b) *Matériel.*

Un poste de soudage comprend :

- — un générateur,
- — une torche qui est le support de l'électrode de tungstène et de la canalisation d'argon,
- — une bouteille d'argon avec manodétendeur,
- — les accessoires habituels : masques, gants, etc.

#### 1° Générateurs.

On utilise le courant alternatif sous une tension à vide de 185 V ; un générateur statique spécial est alors nécessaire.

Si on veut employer un générateur statique de soudage à l'arc ordinaire (tension à vide 45 V), il faut le compléter par un petit générateur à haute fréquence destiné à produire une étincelle entre la pièce à souder et l'électrode de tungstène. Ainsi l'atmosphère d'argon ionisée se laissera facilement traverser par le courant de soudage.

Le courant continu, dont la tension à vide est de 40 V, convient parfaitement pour le soudage des aciers inoxydables, du nickel, du cuivre et de leurs alliages, mais non pour les alliages légers d'aluminium et magnésium.

Les générateurs ordinaires de soudage à l'arc peuvent être utilisés.

#### 2° Torche de soudage.

Les torches servent de support à l'électrode de tungstène, permettent d'établir un contact électrique entre l'électrode et un pôle du générateur et enfin amènent l'argon à l'endroit de l'arc. Très souvent, les torches comportent en outre un circuit d'eau de refroidissement.

Il existe des torches conçues pour soudage manuel et des torches de soudage automatique.

3° **Applications et avantages du procédé.**

Le soudage à atmosphère d'argon est particulièrement avantageux pour le soudage des métaux suivants :

Les aciers ordinaires en tôle très mince jusqu'à 3/10 de mm, les aciers spéciaux en toutes épaisseurs, l'aluminium, le magnésium et leurs alliages, le nickel, le cuivre et leurs alliages, les métaux spéciaux utilisés pour la production de l'énergie atomique.

Le soudage à l'argon donne des soudures de haute qualité et de bel aspect, résultat de l'absence de flux chimique liquide ou solide, toujours difficile à éliminer, et de la protection parfaite contre l'oxydation.

Ce procédé trouve dans l'industrie des applications de plus en plus nombreuses. Il s'est substitué à peu près partout au soudage par hydrogène atomique.

## 4° Soudage par étincelles.

Ce procédé est utilisé pour souder en bout des tôles minces. La chaleur nécessaire pour porter le métal à la fusion est empruntée à un arc électrique établi entre les bords des tôles à assembler.

Les pièces $P_1$ et $P_2$ à souder sont serrées respectivement entre deux mors TT' et $T_1$ $T'_1$ réunis aux bornes d'une source de courant (voir *fig.* 43).

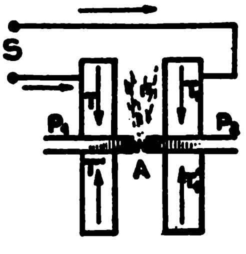



*Fig.* 43. — Schéma de principe du soudage par étincelles : production de l'arc.

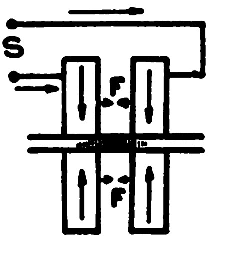



*Fig.* 44. — Schéma de principe du soudage par étincelles : accostage.

On rapproche les deux paires de mors et, les pièces étant en contact, un courant électrique s'établit. On écarte ensuite les mors, un arc électrique se produit et la chaleur développée porte à la fusion le bord des pièces. On assiste alors à la projection de particules de métal en fusion sous l'action du champ magnétique créé par le passage du courant. C'est la production de cette projection d'étincelles qui a donné le nom au procédé.

Lorsque la fusion du métal s'est produite sur toute la longueur de la pièce, les mors se rapprochent, le métal venant en contact est comprimé et le soudage se produit (*fig.* 44).

Ce procédé est utilisé en construction automobile pour le soudage de la carrosserie.

Les *figures* 45 et 46 schématisent l'assemblage du toit de la carrosserie aux deux côtés, ces trois pièces étant en tôle emboutie de 6 à 7/10 de mm. L'opération est exécutée sur des montages métalliques ; elle dure une dizaine de secondes.

## 5° Soudage par résistance.

Le principe du soudage par résistance a été étudié au cours de l'exposé sur les procédés de forgeage, à l'occasion de l'étude des machines à souder en bout.

Ce procédé de soudage est utilisé en tôlerie pour l'assemblage des tôles : soudage électrique par points et soudage continu à la molette.

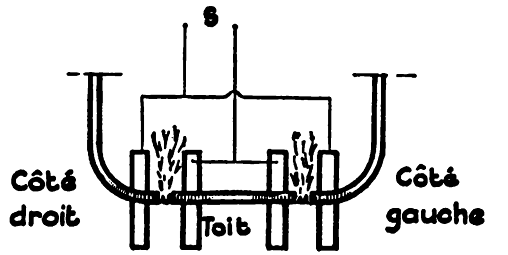



*Fig.* 45. — Soudage de la tôlerie d'une automobile 1re opération : production de l'arc.

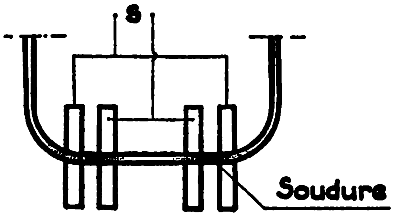



*Fig.* 46. — Soudage de la tôlerie d'une automobile - 2e opération : accostage.

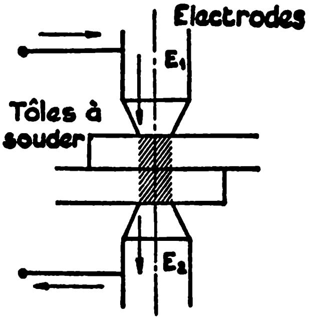



*Fig.* 47. — Schéma de principe du soudage par points.

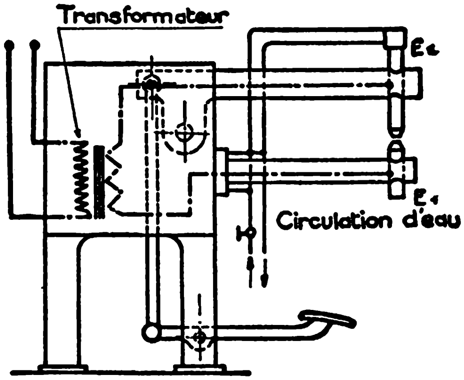



*Fig.* 48. — Schéma d'un poste de soudage par points.

### a) *Soudage par points.*

Les tôles à assembler sont disposées l'une sur l'autre et serrées entre deux électrodes en cuivre $E_1$ et $E_2$ (*fig.* 47), connectées aux bornes d'une source de courant alternatif. La chaleur dégagée par le passage du courant à travers le métal produit sa fusion et la pression exercée par les électrodes assure le soudage. En déplaçant les tôles sous les électrodes, on réalise ainsi des points de soudure qui remplacent avantageusement les rivets d'assemblage.

La *figure* 48 est la représentation schématique d'une machine à souder par points. Au point de vue électrique, la machine comprend un transformateur abaisseur de tension dont les extrémités du secondaire sont réunies aux électrodes de cuivre. Celles-ci sont refroidies par un courant d'eau.

L'électrode $E_1$ est disposée à l'extrémité d'un bras fixe, l'autre, $E_2$, est fixée sur un bras mobile commandé par pédale.

Le soudage comporte trois opérations :

a) *l'accolage*, c'est-à-dire le contact de la tôle avec les électrodes ;
b) *le chauffage* produit par le passage d'un courant très intense pendant un temps très court ;
c) *le forgeage* qui résulte de la pression exercée sur les tôles par des ressorts ou un piston à commande pneumatique. Il provoque le soudage des pièces, puis l'électrode supérieure se soulève afin de permettre leur déplacement et l'exécution d'un nouveau point de soudure.

**b) *Soudage continu à la molette.***

Par ce procédé, on obtient une ligne continue de soudure. Les électrodes sont remplacées par deux molettes tournantes en cuivre entre lesquelles passent l'une sur l'autre les tôles à souder (*fig.* 49). Les molettes compriment les pièces, assurent la circulation du courant et l'avancement des tôles. Un dispositif spécial règle, à cadence rapide, l'interruption puis le rétablissement du courant. On obtient ainsi une série de points de soudure allongés qui se chevauchent et constituent une ligne continue de soudure.

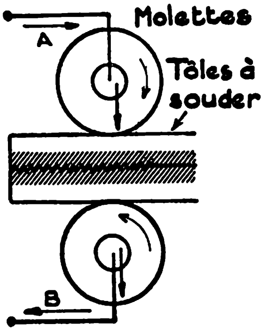



*Fig.* 49. — Schéma de principe du soudage continu à la molette.

## B. — Soudages hétérogènes

### 1° Généralités.

Les caractéristiques d'un soudage hétérogène sont les suivantes :

— le métal assurant la liaison des pièces à assembler est différent de celui qui les constitue ;
— il est déposé par fusion ;
— les pièces à assembler ne sont pas portées à leur température de fusion.

Lorsque le métal employé pour la soudure fond à haute température, le soudage porte le nom de *brasage*.

Lorsque le métal utilisé fond à basse température, on dit que l'on a réalisé un *soudage tendre*.

### 2° Brasage.

Le métal utilisé est un alliage de cuivre, laiton ou bronze, à point de fusion compris entre 800 et 900°. On emploie le plus souvent un laiton à 17 % de zinc et 83 % de cuivre.

Pour les brasages délicats (lames de scies, orfèvrerie), on lui préfère les alliages d'argent (55 à 70 % Ag).

Les alliages pour brasage sont vendus sous forme de grains, de baguettes plates ou cylindriques, ou encore de rubans (alliages à base d'argent).

Pour exécuter un brasage, il est nécessaire de chauffer les pièces et de provoquer la fusion de l'alliage.

L'adhérence entre les corps en contact nécessite le décapage parfait des pièces au droit de la brasure ; les pièces doivent être au préalable blanchies à la lime ; on utilise, au cours de l'opération, un décapant qui réduit les oxydes, au fur et à mesure de leur formation : borax ou pâte à braser.

Les combustibles choisis pour le chauffage des pièces ne doivent pas donner de fumées qui risqueraient de les souiller. Les brasages se font sur un feu de charbon de bois, de coke, ou en utilisant la flamme de la lampe à souder ou du chalumeau oxyacétylénique. Lorsque ce dernier mode de chauffage est appliqué, le procédé porte le nom de *soudo-brasage* et l'on paraît réserver le seul nom de *brasage* aux opérations faisant appel au chauffage au charbon de bois, au coke ou à la lampe à souder.

Le soudo-brasage se répand de plus en plus. On utilise des baguettes cylindriques en bronze spécial (brox ou bronzogène) et un flux décapant constitué par une pâte ou une poudre. Les pièces soudo-brasées doivent être chanfreinées lorsqu'elles sont épaisses.

Le soudo-brasage s'applique avantageusement à la réparation de pièces cassées en fonte, en acier, en bronze ou en laiton, à la construction d'appareils en tôle ou en tubes d'acier galvanisés ou étamés, et même à l'assemblage de pièces d'acier entrant dans les constructions neuves (en particulier pour la fixation des brides sur les tuyaux).

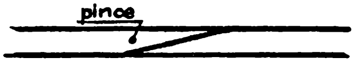



*Fig.* 50. — Brasure par recouvrement.

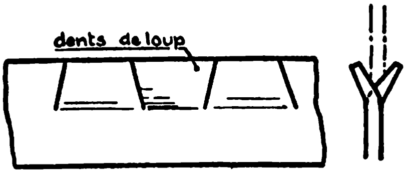



*Fig.* 51. — Brasure à dents.

Le brasage simple reste utilisé surtout pour l'assemblage des tôles qui peuvent être disposées bout à bout, à recouvrement avec pince en sifflet (*fig.* 50), ou accrochées avec dents de loup (*fig.* 51).

Les brasures présentent une résistance mécanique assez importante, celle de l'alliage qui a été utilisé : elles peuvent donc supporter des efforts importants.

## 3° Soudage à l'étain.

Les soudures sont réalisées avec des alliages de plomb et d'étain :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Soudure des électriciens : | 37 % Pb | — | 63 % Sn, | fusion à 182° |
| Soudure des ferblantiers : | 33 % Pb | — | 67 % Sn, | fusion à 170° |
| Soudure des plombiers : | 67 % Pb | — | 33 % Sn, | fusion à 220° |

L'alliage pour soudage se présente sous forme de baguettes ou de fils.

Le soudage tendre, encore appelé *soudage à l'étain*, permet l'assemblage de tôles d'acier, de cuivre, de laiton, de zinc et de plomb.

La réussite d'un soudage dépend de la propreté des pièces à assembler. Celles-ci doivent donc être décapées au moyen de résine ou de chlorure de zinc (préparé en plaçant un morceau de zinc dans de l'acide chlorhydrique).

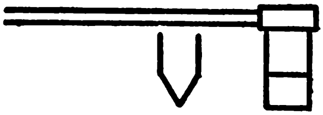


*Fig.* 52. — Fer à souder.

La fusion de l'alliage pour soudage s'obtient par contact avec un fer à souder (*fig.* 52) chauffé à la forge à charbon de bois, à la lampe à souder, ou à l'électricité.

La partie essentielle d'un fer à souder est un bloc de cuivre (corps difficilement oxydable, et de bonne conductibilité thermique) chargé d'emmagasiner la chaleur et de la restituer lentement au moment du soudage.

Avant utilisation on trempe la partie active du fer, taillée en biseau, dans du chlorure de zinc, ou on la frotte sur un bloc de chlorure d'ammonium pour la décaper.

L'assemblage des pièces se fait par recouvrement, les parties en contact ayant été préalablement étamées au fer.

Le soudage tendre est un soudage d'étanchéité et non un soudage de résistance.

Il se conjugue souvent à un assemblage résistant (l'agrafage ou le rivetage) pour le rendre étanche.

Le soudage à l'étain est utilisé pour la fabrication d'ustensiles de ménage en fer-blanc, en zinc ou en laiton, pour l'exécution et la fermeture des boîtes de conserve, et pour la fabrication du petit appareillage électrique (notamment lampes et jonction des conducteurs de T. S. F.).

◇

# L'usinage

L'usinage a pour objet la réalisation de pièces métalliques par enlèvement de matière à froid, au moyen d'outils produisant des copeaux dont les dimensions peuvent aller de celles de la limaille à celles du ruban enroulé de plusieurs mètres de long et de quelques $mm^2$ de section.

Les outils sont de deux types :

**ceux qui taillent ou coupent le métal** : outils de tour, de raboteuse, fraises, forets, alésoirs, etc.

**ceux qui le grattent** : grattoirs, meules, poudres à roder.

Pour produire un copeau, il faut :
— **donner à l'outil une forme convenable,**
— **le faire pénétrer dans la matière à usiner,**
— **produire le déplacement relatif de la pièce par rapport à l'outil.**

Les déplacements nécessaires à la coupe peuvent résulter de l'action directe de l'ouvrier : **travail à la main** (taraudage, alésage, limage), ou être obtenus au moyen de machines-outils sur lesquelles sont montés outils et pièces : **usinage mécanique.**

## GÉNÉRATION DES SURFACES USINÉES

La production du copeau résulte d'un mouvement rapide, communiqué soit à la pièce (tour), soit à l'outil (étau-limeur, fraiseuse, perceuse). C'est le **mouvement de coupe,** qui peut être une **rotation** ou une **translation** :
**rotation de la pièce** : tour ;
**rotation de l'outil** : fraiseuse et perceuse ;
**translation de l'outil** : étau-limeur.

Pour produire l'usinage sur toute la surface travaillée de la pièce, un deuxième mouvement est nécessaire : le **mouvement d'avance,** translation très lente en général :
**déplacement de la pièce** : fraiseuse et étau-limeur ;
**déplacement de l'outil** : tour et perceuse.

Les pièces de mécanique présentent généralement des surfaces, intérieures ou extérieures, simples :

1° **Des plans** ;

2° **Des cylindres** à directrice circulaire ou quelconque (cames, engrenages) ;

3° **Des surfaces de révolution** à génératrice droite (cône) ou quelconque (poignée de manivelle, congé de raccordement...) ;

4° **Des surfaces hélicoïdales** (filetages).

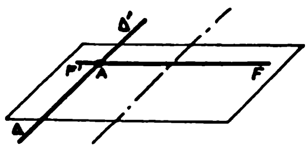



*Fig.* 1. — Génération du plan par translation d'une droite.

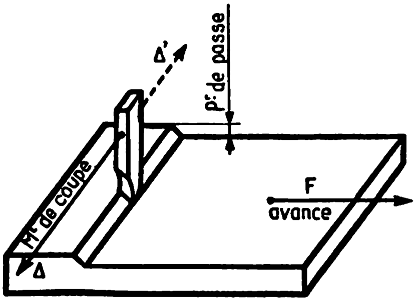



*Fig.* 2. — Usinage à l'étau-limeur.

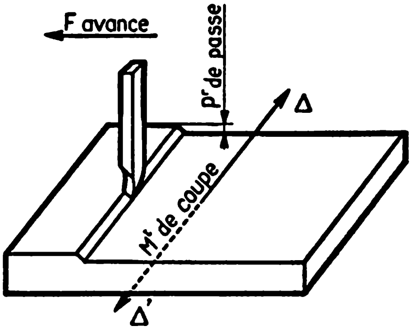



*Fig.* 3. — Usinage à la raboteuse.

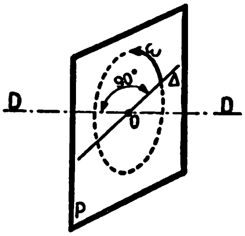



*Fig.* 4. — Génération du plan par rotation d'une droite.

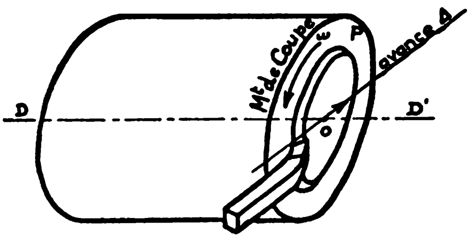



*Fig.* 5. — Usinage d'un plan au tour.

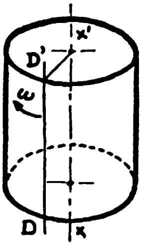



*Fig.* 6. — Génération du cylindre.

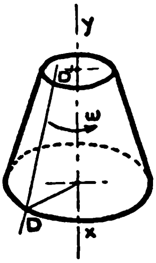



*Fig.* 7. — Génération du cône.

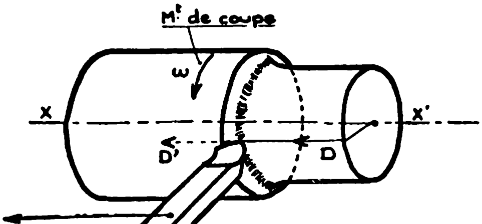



*Fig.* 8. — Usinage d'un cylindre au tour.

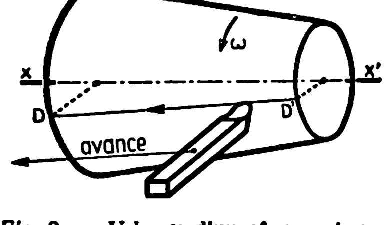



*Fig.* 9. — Usinage d'un cône au tour.

La connaissance des propriétés géométriques de ces surfaces a permis d'établir la manière de les obtenir et a guidé l'ingénieur pour l'étude des machines-outils.

Les exemples suivants illustrent ce fait :

## A. — Production de surfaces planes

Le plan peut être considéré comme engendré par une droite ΔΔ′ qui se déplace parallèlement à elle-même et reste en contact avec une droite FF′ (*fig.* 1).

On en déduit les deux procédés d'usinage :

a) **Étau-limeur** (*fig.* 2) : le mouvement de l'outil matérialise la droite ΔΔ′, c'est le mouvement de coupe ;

Le déplacement de la pièce matérialise la droite FF′ : c'est l'avance.

b) **Raboteuse** (*fig.* 3) : le déplacement de la pièce correspond à la droite ΔΔ′ (mouvement de coupe) ; et le déplacement latéral de l'outil correspond à la droite F (avance).

D'autre part, on peut considérer le plan comme étant engendré par une droite Δ perpendiculaire à une autre DD′ et décrivant un mouvement de rotation ω (voir *fig.* 4).

De cette définition, on déduit la méthode à suivre pour obtenir au tour les surfaces planes (voir *fig.* 5).

## B. — Production de surfaces de révolution

Le cylindre et le cône peuvent être considérés comme des surfaces engendrées par une droite DD′ tournant autour d'un axe XX′ (*fig.* 6 et 7) ; on déduit aisément les méthodes d'usinage de ces surfaces : par exemple, au tour, le déplacement de l'outil matérialise la droite DD′ (*fig.* 8 et 9). On conçoit de même la réalisation de surfaces cylindriques intérieures sur l'aléseuse ou la perceuse : pièce fixe et outil possédant à la fois le mouvement de rotation et le mouvement d'avance.

## C. — Travail d'enveloppe et travail de forme

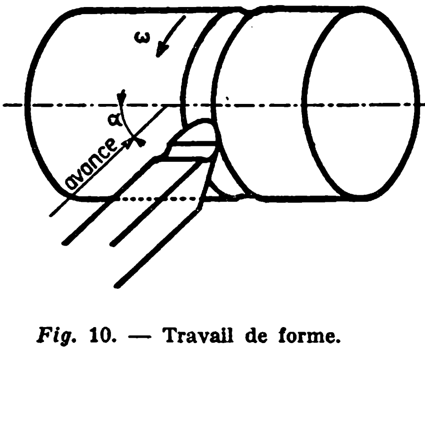



*Fig.* 10. — Travail de forme.

Sur les surfaces dont nous venons d'étudier l'usinage, on ne doit pas retrouver en principe la forme de l'outil : on réalise un travail d'enveloppe. Dans ce cas, le mouvement d'avance est parallèle à la surface de la pièce.

Lorsque la surface usinée doit présenter le même profil que l'outil, on dit que l'on effectue un travail de forme. Le mouvement d'avance est alors perpendiculaire à la surface usinée (voir *fig.* 10) ou oblique par rapport à celle-ci.

# Étude géométrique des outils

## FORME ET CARACTÉRISTIQUES DES OUTILS A UNE SEULE ARÊTE DE COUPE

### Étude conforme au projet de norme internationale ISO-DIS 3002.

### A. — Forme

Un outil comporte un **corps**, barreau prismatique ou bloc cylindroconique (fraises), destiné à mettre en position et à fixer l'outil sur la machine.

Sur ce corps sont disposées ou taillées la ou les **parties actives**, celles qui sont destinées à favoriser la production des copeaux (*fig.* 11).

La **partie active** consiste essentiellement en deux surfaces : la **face de dépouille** et la **face de coupe** ; l'intersection de ces deux faces est l'arête de l'outil.

La face de dépouille est placée du côté de la surface usinée. Sur la face de coupe glisse le métal taillé (copeau).

La partie active de l'outil doit avoir une dureté plus grande que le métal à travailler : aussi peut-elle être constituée par un métal différent de celui du corps.

Le corps de l'outil est **prismatique** ou **cylindrique.**

Il est le plus souvent prismatique parce que cela permet une facile immobilisation dans le support.

Un outil prismatique comprend deux surfaces planes de référence : l'une, opposée à l'arête tranchante, est la surface de base ; l'autre, adjacente au plan de base, lui est perpendiculaire.

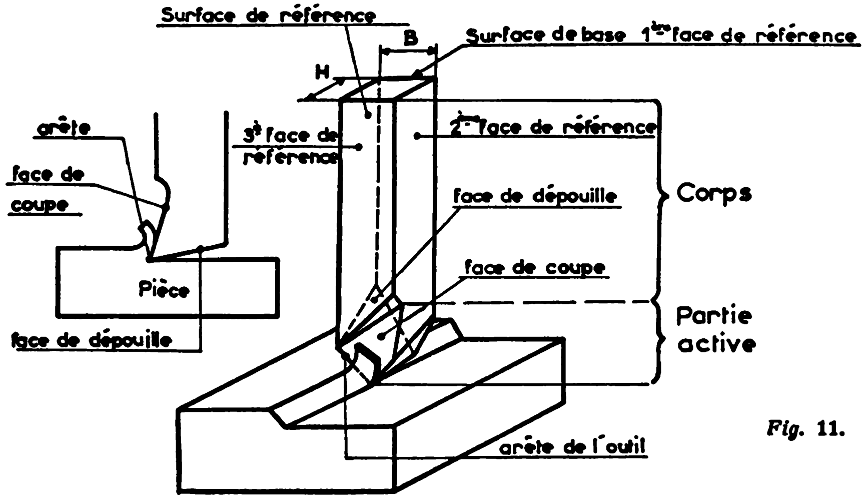



*Fig.* 11.

L'intersection des faces latérales du prisme constitue les génératrices du corps de l'outil. Souvent on usine une troisième face parallèle à la seconde surface de référence.

Lorsque le corps de l'outil est cylindrique, la surface de référence est la surface cylindrique elle-même, qui est usinée. Un méplat réalisé sur le corps cylindrique permet de contrôler l'orientation de la partie active.

## B. — Profil

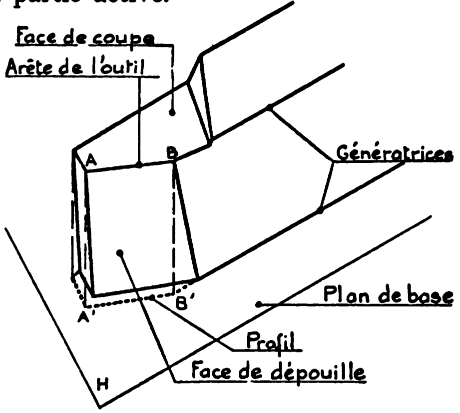



*Fig.* 12. — Caractéristiques de la partie active d'un outil : définition du profil.

La projection de l'arête AB sur plan de base (voir *fig.* 12) est appelée *profil* de l'outil : c'est la droite A′B′.

Les conditions d'emploi des outils, en fonction du sens d'avance ou de l'opération à exécuter, permettent de caractériser le profil des outils.

Sur la *figure* 13, nous avons représenté deux outils dont le profil A′B′ est différent : pour ces deux outils, les mouvements d'avance M*a* sont prévus perpendiculaires aux génératrices, mais de sens contraire ; ce sont des outils à charioter. Pour les désigner, on convient de les disposer ainsi : les génératrices verticales, la surface de base en arrière, l'arête tranchante vers le bas.

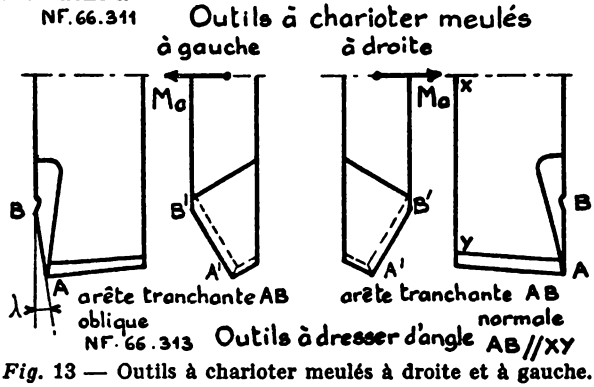



*Fig.* 13 — Outils à charioter meulés à droite et à gauche.

L'outil est dit *à profil à droite* si l'arête tranchante, projetée sur la *figure* 13 suivant le profil A′B′, est disposée à droite d'un observateur placé devant sa face d'attaque. Il est *à profil à gauche* si l'arête tranchante est placée à gauche de cet observateur.

Plus simplement, on dit que l'outil est « à droite » ou « à gauche ».

La *figure* 14 représente deux outils : l'un à droite, l'autre à gauche, prévus pour un mouvement d'avance pa-

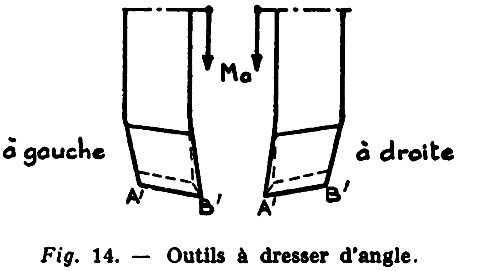



*Fig.* 14. — Outils à dresser d'angle.

rallèle à ses génératrices : ce sont des *outils à dresser.* Les différentes utilisations des outils conduisent à définir en premier lieu la forme du profil des outils. La *figure* 15 représente, pour diverses opérations d'usinage, quelques outils à profils différents : outil à charioter coudé, outil couteau, outil à dresser d'angle, outil à dresser les faces, outil pelle, outil à saigner, outil à fileter, outil à chambrer. La forme exacte des outils est définie sur des feuilles de normes dont le numéro est donné sur la *figure* 15.

*Exemple* : NF. 66 312—NF. 66 313...

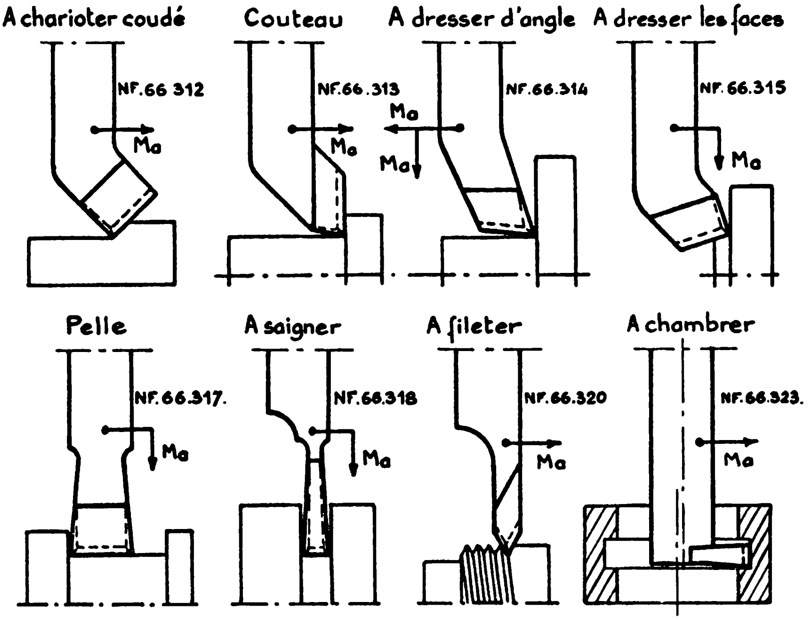



*Fig.* 15. - - Principales formes d'outils normalisés.

## DROITE DE PLUS GRANDE PENTE D'UN PLAN

L'étude géométrique de l'outil de coupe et la recherche des opérations permettant d'assurer l'affûtage des faces de dépouille et de coupe nous conduisent à définir les droites de plus grande pente de ces faces par rapport au plan de référence $P_r$ ou de base $P_{r1}$.

Examinons la *figure* 16-1 qui représente deux plans sécants : le plan $F_c$ et le plan $P_{r1}$. Leur droite d'intersection est $x_1x'_1$. Ces deux plans constituent un dièdre. Soit un point A du plan $F_c$ dont la projection sur $P_{r1}$ est A'. Si j'abaisse de A dans le plan $F_c$ la perpendiculaire AH sur $x_1x'_1$, on démontre (*théorème des trois perpendiculaires*) que A'H, projection de AH du plan $F_c$ sur le plan $P_{r1}$, est elle aussi perpendiculaire sur $x_1x'_1$. Ainsi le plan AA'H est perpendiculaire à l'arête $x_1x'_1$, intersection du dièdre $F_c$-$P_{r1}$. Donc l'angle $\widehat{AHA'} = \widehat{\gamma_c}$ est l'**angle plan ou le rectiligne du dièdre.**

Soit un point H′ de $x_1x'_1$, distinct de H. La droite A′H est la projection de AH′ du plan $F_c$ sur $P_{r1}$. Soit $\widehat{AH'H} = \widehat{\gamma'_c}$.
Il est facile de démontrer les relations suivantes :

$$AH < AH' \qquad \gamma_c > \gamma'_c$$

La droite AH est appelée **droite de plus grande pente** du plan $F_c$ sur le plan $P_{r1}$ passant par A. Elle est la droite du plan $F_c$ passant par A qui fasse le plus grand angle avec sa projection sur le plan $P_{r1}$.

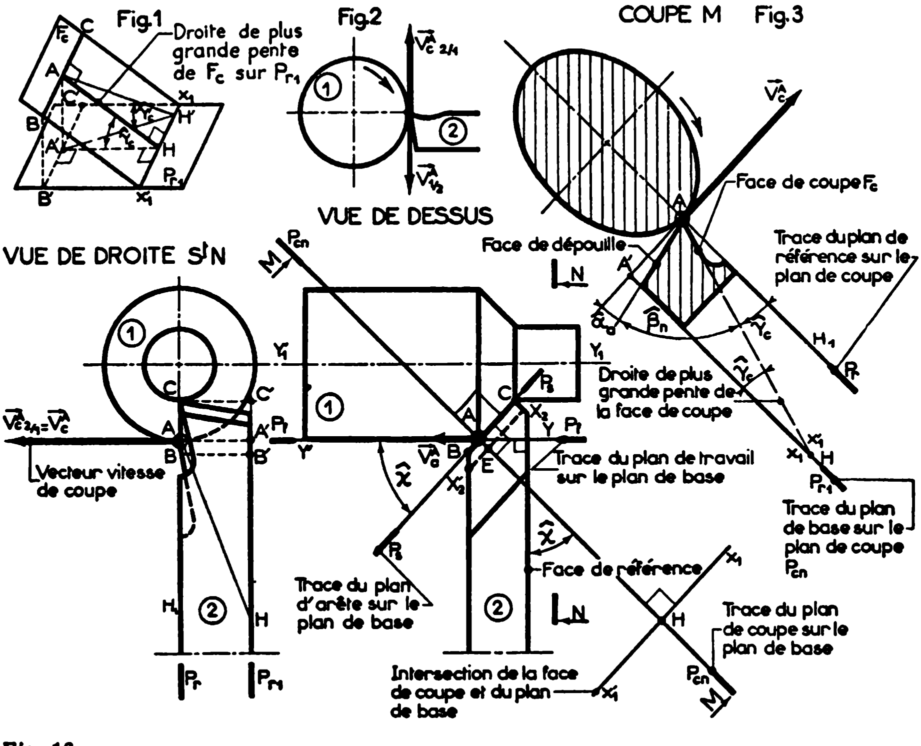



*Fig.* 16.

## C. — Caractéristiques de la partie active des outils

L'étude se rapporte aux outils dont l'arête est contenue dans le plan de référence $P_r$ parallèle au plan de base $P_{r1}$. Ces deux plans, représentés sur les *figures* 16 et 17, seront définis par la suite.

Les faces de la partie active de l'outil (face de coupe et face de dépouille) sont définies en position par rapport aux vecteurs vitesse du mouvement de coupe et vitesse du mouvement d'avance. Il faut donc se placer dans un cas concret : nous avons choisi un outil de tournage représenté en position de travail

sur la *figure* 16-3 en projection et sur la *figure* 17 en perspective. Le **mouvement de coupe** est la rotation uniforme de la pièce 2. Le **mouvement d'avance** qui conditionne l'épaisseur du copeau est la translation rectiligne uniforme de l'outil parallèle à l'axe de la pièce $Y_1'Y_1$. Bien que ces mouvements soient simultanés, nous les considérerons isolément pour définir leur vitesse.

On suppose un point A commun à l'arête de l'outil et à la pièce.

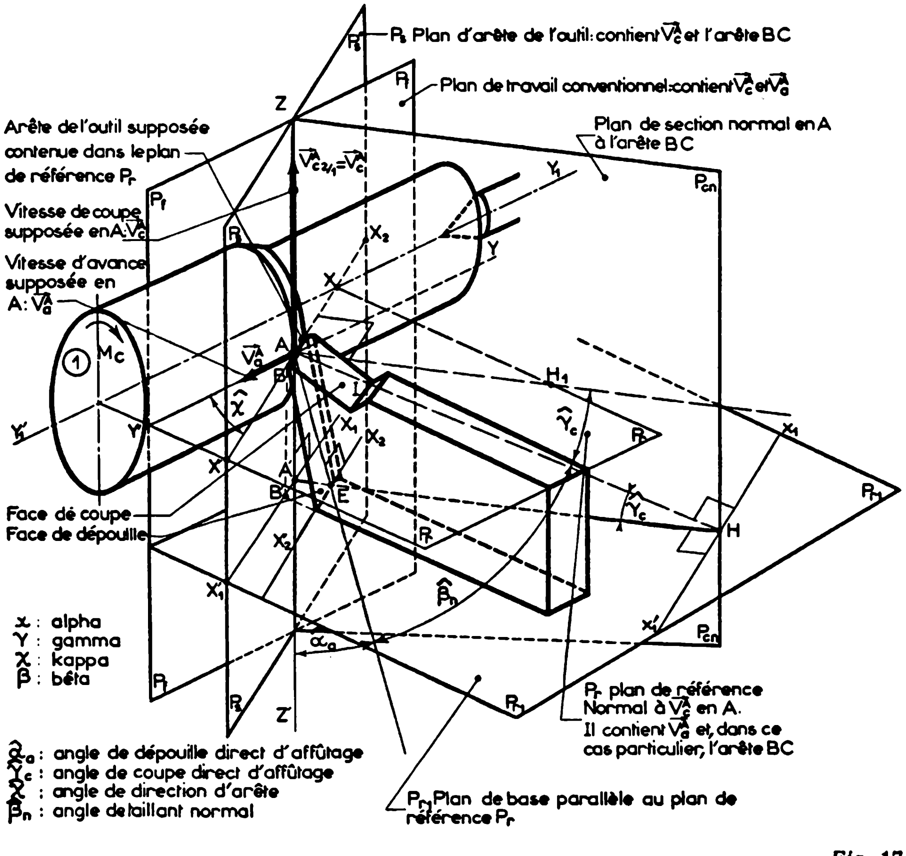



*Fig.* 17.

## 1° Vitesse de coupe supposée en A (*voir fig.* 16-2 et 17).

Le mouvement d'avance est supposé arrêté. Un point A de la pièce est en mouvement de rotation uniforme autour de l'axe $Y_1'Y_1$. La vitesse du point A est représentée par le vecteur $\overrightarrow{V_{1/2}^A}$ (vitesse du point A de la pièce 1 par rapport à l'outil 2). Il est tangent à la circonférence trajectoire de A et est orthogonal à l'axe $Y_1'Y_1$ de la pièce.

Si nous considérons la pièce immobile, l'outil étant animé d'un mouvement de rotation uniforme autour de $Y_1'Y_1$, mais dans le sens inverse du précédent, le vecteur vitesse du point A de l'outil 2 par rapport à la pièce 1, $\overrightarrow{V^A_{a/1}}$ ou $\overrightarrow{V^A_c}$, représente la **vitesse de coupe supposée au point A.** Ce vecteur est égal et directement opposé au vecteur $\overrightarrow{V^A_{1/2}}$. Pour simplifier le langage, le vecteur $\overrightarrow{V^A_c}$ représente la **vitesse de coupe en A.**

**2° Vitesse d'avance supposée en A.**

Le mouvement de coupe est supposé arrêté. On considère le mouvement du point A de l'outil 2 par rapport à la pièce 1 : c'est le mouvement d'avance. La **vitesse d'avance supposée** est la vitesse du point A : elle est représentée par le vecteur $\overrightarrow{V^A_{a/1}}$, désigné plus simplement par $\overrightarrow{V^A_a}$. Dans le cas présent, le mouvement d'avance est une translation rectiligne uniforme parallèle à l'axe de la pièce $Y_1'Y_1$. Le vecteur $\overrightarrow{V^A_a}$ est aussi parallèle à l'axe $Y_1'Y_1$ et confondu avec la directrice du cylindre Y'Y.

Les vitesses de coupe et d'avance **supposées** ayant été bien définies, pour simplifier nous désignerons le vecteur $\overrightarrow{V^A_c}$ par vecteur vitesse de coupe au point A et le vecteur $\overrightarrow{V^A_a}$ par vecteur vitesse d'avance au point A.

**3° Plans de référence de l'outil.**

La forme de la partie active de l'outil est définie à partir de trois plans caractéristiques qui sont représentés en perspective sur la *figure* 17 et par leurs traces avec les plans de projection sur la *figure* 16-3. Les positions de ces plans relatifs à un point de l'arête tranchante sont dépendantes de la situation des vecteurs $\overrightarrow{V^A_c}$ et $\overrightarrow{V^A_a}$ (vitesse de coupe **supposée** et vitesse d'avance **supposée**). On définit ainsi la forme de l'outil dit *en main*, par opposition à l'outil *en travail* dont il sera question dans le tome 2.

***a) Plan de travail $P_f$ en A.***

Le plan de travail $P_f$ contient les vecteurs $\overrightarrow{V^A_c}$ et $\overrightarrow{V^A_a}$.

***b) Plan d'arête $P_s$ en A.***

Le plan d'arête $P_s$ contient le vecteur $\overrightarrow{V^A_c}$ et la tangente à l'arête tranchante au point A. Dans le cas présent, puisque l'arête de l'outil est rectiligne, il contient $\overrightarrow{V^A_c}$ et l'arête BC. Les deux plans $P_f$ et $P_s$ se coupent suivant la ligne d'action Z'Z du vecteur vitesse de coupe $\overrightarrow{V^A_c}$.

***c) Plan de référence $P_r$ en A.***

Le plan de référence de l'outil contient le vecteur vitesse d'avance $\overrightarrow{V^A}$ et est perpendiculaire au vecteur vitesse de coupe $\overrightarrow{V^A_c}$. Dans le cas présent qui est le **plus fréquent,** ce plan contient toute l'arête rectiligne BC. L'outil est dit avoir

un angle d'inclinaison d'arête nul. Dans ce tome 1, nous n'étudierons que ce genre d'outils.

**Remarques.** — Le plan de référence $P_r$ contient l'axe $Y_1'Y_1$ de la pièce. Il coupe le plan de travail $P_f$ suivant la génératrice du cylindre Y'Y et le plan d'arête $P_s$ suivant la droite X'X qui est la droite support de l'arête BC.

### *d) Angle de direction d'arête* $\hat{\varkappa}$ *(kappa): fig.* 16 et 17.

L'angle que font les deux demi-droites AY' et AX' : $\widehat{Y'AX'}$ est appelé *angle de direction d'arête.* Il est l'angle des deux plans $P_f$ et $P_s$ puisque AY' et AX' sont les demi-droites d'intersection des plans $P_f$ et $P_s$ avec le plan $P_r$ qui est perpendiculaire à leur droite d'intersection ZZ'. Cet angle de direction d'arête est désigné par $\hat{\varkappa}$ (*kappa*). Si la deuxième face de référence de l'outil (*fig.* 11) est normale au vecteur $\overrightarrow{V_a^A}$, l'angle $\hat{\varkappa}$ est aussi l'angle que font le plan de coupe normal $P_{cn}$ et le plan de la deuxième face de référence (*voir fig.* 16-3).

### *e) Plan de base.*

Le plan de base permet de situer l'outil sur le chariot de la machine-outil qui assure les déplacements de réglage et d'avance. Ce plan est généralement choisi, pour les outils ayant un angle d'inclinaison d'arête nul, parallèle au plan de référence $P_r$ : il est le plan $P_{r1}$ sur la *figure* 17.

Il est intéressant de faire les observations suivantes :

- — l'arête BAC est parallèle au plan de base $P_{r1}$ ;
- — la projection de l'arête BAC sur le plan $P_{r1}$ est B'A'C' (droite $X_1'X_1$ parallèle à X'X) ;
- — l'intersection de la face de dépouille avec le plan $P_{r1}$ est la droite $X_2'X_2$ parallèle aux droites $X_1'X_1$ et X'X ;
- — l'intersection de la face de coupe (qui contient la droite X'X) avec le plan $P_{r1}$ est la droite $x'x$ parallèle à X'X.

## ANGLES CARACTÉRISTIQUES DE LA PARTIE ACTIVE DE L'OUTIL

On coupe l'outil par un plan $P_{cn}$ normal à l'arête de coupe au point A. Ce plan contient la droite ZZ', puisque ZZ' est perpendiculaire au plan de référence et, de ce fait, à la droite X'X (*voir fig.* 16-3 et 17). Ce plan $P_{cn}$ coupe :

- — le plan de référence $P_r$ suivant la droite $AH_1$ ;
- — le plan de base $P_{r1}$ suivant la droite A'EH (cette droite est perpendiculaire aux droites $X_1'X_1$, $X'X_2$, $x_1'x_1$) ;
- — la face de coupe suivant la droite AH (le point H est sur la droite d'intersection $x_1'x_1$) ;
- — la face de dépouille suivant la droite AE ;
- — le plan d'arête $P_s$ suivant la droite ZZ'.

On remarquera, en se reportant à la définition de la droite de plus grande pente d'un plan (*fig.* 16-1), que :

- — la droite AH est la droite de plus grande pente de la face de coupe par rapport au plan de référence $P_r$ ou par rapport au plan de base $P_{r1}$ qui est parallèle à $P_r$ ;

— la **droite AE** est la droite de plus grande pente de la face en dépouille et du plan d'arête $P_s$.

### 1° Angle de dépouille normal ou direct d'affûtage : $\widehat{\alpha_a}$.

C'est l'angle $\widehat{A'AE}$ fait par les droites d'intersection du plan de coupe normal $P_{cn}$ avec le plan d'arête $P_s$ (droite AA′) et la face de dépouille (droite AE). Dans le cas particulier de l'outil étudié, cet angle de dépouille est appelé **angle de dépouille direct d'affûtage.** Il est désigné par $\widehat{\alpha_a}$ (*alpha* indice *a*).

### 2° Angle de coupe normal ou direct d'affûtage : $\widehat{\gamma_n}$.

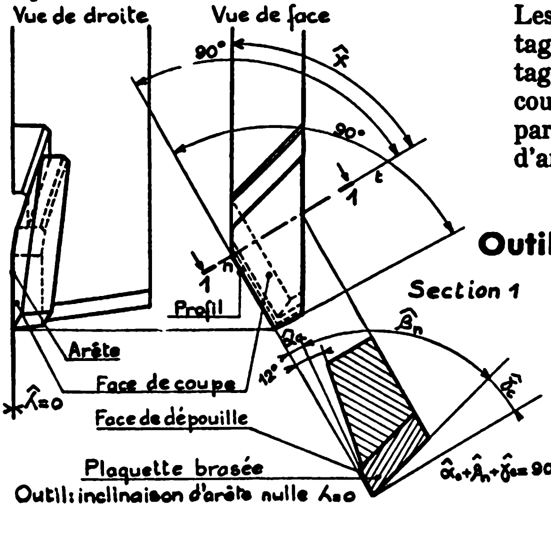
C'est l'angle $\widehat{H_1AH}$ fait par les droites d'intersection du plan de coupe normal $P_{cn}$ avec le plan de référence $P_r$ (droite $AH_1$) et la face de coupe (droite AH). Dans le cas particulier de l'outil étudié, cet angle de coupe est appelé **angle de coupe direct d'affûtage** et désigné par $\widehat{\gamma_c}$ (*gamma* indice *c*). On retrouve cet angle en H puisque $AH_1$ est parallèle à $A'H_1$ ; on a : $\widehat{AH_1A'} = \widehat{\gamma_c}$.

### 3° Angle de taillant normal : $\widehat{\beta_n}$.

C'est l'angle $\widehat{EAH}$ des droites d'intersection du plan de coupe normal $P_{cn}$ avec la face de dépouille (droite AE) et la face de coupe (droite AH). **L'angle de taillant normal** est désigné par $\widehat{\beta_n}$ (*bêta* indice *n*).

## REMARQUE TRÈS IMPORTANTE

— L'angle de coupe direct d'affûtage $\widehat{\gamma_c}$ est l'angle de plus grande pente de la face de coupe avec le plan de référence $P_r$ (ou avec le plan qui lui est parallèle : le plan de base $P_{r1}$).
— L'angle de dépouille direct d'affûtage est l'angle de plus grande pente de la face de dépouille avec le plan d'arête $P_s$.
On utilisera ces propriétés quand on étudiera l'affûtage des faces de coupe et de dépouille.




Les angles de coupe direct d'affûtage $\gamma_c$ et de dépouille direct d'affûtage $\alpha_a$ sont égaux aux angles de coupe normal et de dépouille normal, parce que l'outil est à inclinaison d'arête nulle.

**Outil à plaquette rapportée.**

*Fig.* 18. — Définition des angles caractéristiques d'un outil à charioter à plaquette d'acier rapide rapportée.

Pour réaliser une économie d'acier rapide ou lorsqu'on désire obtenir un outil particulièrement dur, on rapporte par brasage une plaquette d'acier rapide ou de carbure métallique sur un corps d'outil en acier au carbone demi-dur C ou XC 35. On fait déborder la plaquette du côté de la face d'attaque et de la face en dépouille pour limiter à la seule plaquette le meulage indispensable à l'affûtage.

La *figure* 18 représente un outil à charioter à gauche NF. 66 311. Les différents angles ont été portés sur le dessin.

Du côté de la surface en dépouille, le corps de l'outil présente une extrémité bien dégagée par meulage suivant un angle de 12°.

## Outils à pente d'affûtage négative.

Les outils dont la partie active est constituée par des pastilles en carbures métalliques sont fragiles et longs à affûter. Pour augmenter leur résistance, on a réalisé des outils dont l'angle taillant a une valeur égale ou supérieure à 90°. La relation géométrique entre les angles caractéristiques devient : $\hat{a} + \hat{d} - \hat{b} = 90°$ (voir *fig.* 19). Ces outils produisent des copeaux par arrachement du métal. On constate en effet que les copeaux obtenus se brisent au fur et à mesure de leur formation, même lorsqu'ils résultent du travail d'alliages malléables (aciers).

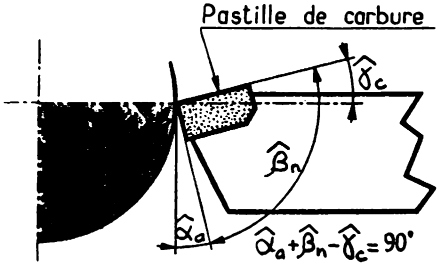



*Fig.* 19. — Outil en carbure à pente d'affûtage négative.

La puissance absorbée augmente dans de fortes proportions. Il a donc été nécessaire de prévoir des machines-outils qui permettent des efforts de coupe importants. Cette nouvelle technique de la coupe du métal est surtout utilisée lorsque l'usinage nécessite l'emploi d'outils complexes d'affûtage long et délicat (fraises, outils de forme).

## Position de l'outil par rapport à la surface usinée.

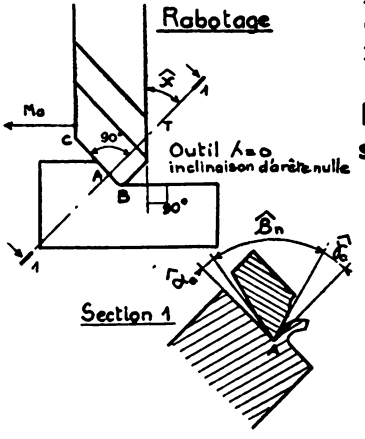



*Fig.* 20. — Positions de l'outil de rabotage par rapport à la surface usinée.

La face de dépouille doit faire, avec la surface usinée ou le plan tangent à cette surface, un angle égal à l'angle de dépouille.

La *figure* 20 représente la position, par rapport à la pièce, d'un outil de rabotage.

Les génératrices de l'outil sont disposées le plus souvent perpendiculaires ou parallèles au vecteur vitesse du mouvement d'avance.

## 6° Valeur des angles caractéristiques des outils.

L'expérience a fixé la valeur des angles $\widehat{\alpha_a}$ et $\widehat{\gamma_o}$.

En maintenant constant l'un des angles $\widehat{\alpha_a}$ ou $\widehat{\gamma_o}$, on a exécuté, avec le même acier rapide et le même traitement thermique, différents outils qui ont été utilisés pour des travaux de série semblables, dans les mêmes conditions de vitesse, d'arrosage, de machine et de métal travaillé. Le nombre de pièces exécutées avant réaffûtage a permis de déterminer les valeurs de $\widehat{\alpha_a}$ et $\widehat{\gamma_o}$ les plus favorables.

Les conclusions de ces essais sont consignées dans le *tableau ci-dessous* :

| MATIÈRE TRAVAILLÉE | OUTILS EN | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ACIER RAPIDE | | | CARBURES MÉTALLIQUES | | |
| | $\widehat{\alpha_a}$ | $\widehat{\gamma_o}$ | $\widehat{\beta_n}$ | $\widehat{\alpha_a}$ | $\widehat{\gamma_o}$ | $\widehat{\beta_n}$ |
| Cuivre, Aluminium et alliages. Magnésium et alliages. | 6° | 40° | 44° | 8° | 30° | 52° |
| Aciers $(Rr)_e$ = 450 à 550 N/mm² *. Fonte grise à cœur. | 6° | 30° | 54° | 4° | 20° | 66° |
| Aciers $(Rr)_e$ = 550 à 650 N/mm². | 6° | 20° | 64° | 4° | 20° | 66° |
| Aciers $(Rr)_e$ = 650 à 900 N/mm² de dureté < 30 Hc Rockwell. Fonte, dureté < 20 Hc Rockwell. Acier coulé, dureté < 20 Hc Rockwell. Bronze et laitons. | 6° | 10° | 74° | 4° | 10° | 76° |
| Acier traité, dureté de 30 à 44 Hc Rockwell. Acier à 12 % de Mn. Fonte, dureté de 20 Hc à 40 Hc Rockwell. | | | | 4° | 6° | 80° |
| Acier traité, dureté de 44 à 54 Hc Rockwell. Acier coulé, dureté < 35 Hc Rockwell. | | | | 4° | 0° | 86° |
| Acier traité, dureté de 54 à 70 Hc Rockwell. | | | | 4° | — 4° | 90° |

* 10 newtons ≃ 1 kilogramme-force (10 N = 1 daN ≃ 1 kgf).

# L'AFFÛTAGE DES OUTILS A ARÊTE TRANCHANTE NORMALE

## A. — Principe

Un outil cesse de tailler convenablement le métal quand son arête tranchante s'est arrondie, quand le copeau a entamé la face de coupe et enfin quand la face de dépouille s'est usée en frottant sur la pièce.

Il faut, pour redonner à l'outil ses qualités premières, meuler sa face de coupe et sa face de dépouille en respectant les angles caractéristiques indispensables à son fonctionnement correct. D'autre part, l'affûtage sera économique si l'on enlève le moins de métal possible sur la partie active : ainsi la réfection de l'outil sera rapide et cet outil durera plus longtemps.

L'affûtage exécuté sur un touret, l'outil étant tenu à la main, est à proscrire : il est imprécis, long et conduit à une usure exagérée de l'outil.

L'emploi d'une *machine à affûter* doit être généralisé : le gain de temps d'affûtage, la plus grande durée de l'outil, le meilleur rendement des machines utilisant des outils bien adaptés, permettent d'amortir très rapidement les machines à affûter.

Une machine à affûter comporte une *meule* à axe généralement horizontal et une *table* support d'outil à affûter.

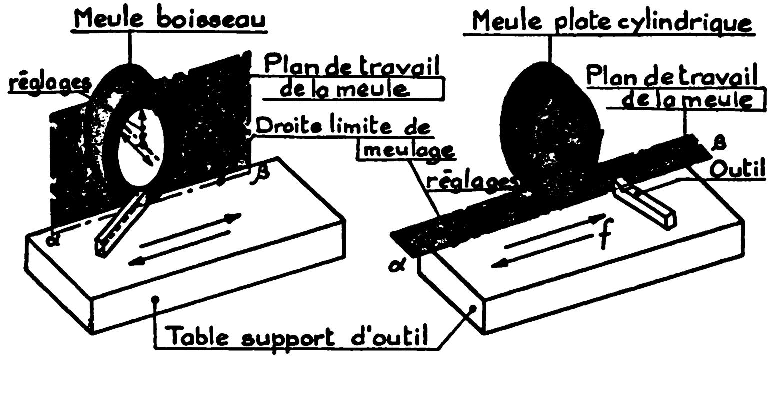



*Fig.* 31. — Schéma de principe des machines à affûter.

Cette **table horizontale**, le plus souvent montée sur galets, peut se déplacer d'un mouvement rectiligne alternatif à commande automatique ou manuelle suivant *f* (voir *fig.* 21). L'axe de la meule est généralement parallèle à la table et perpendiculaire à son déplacement.

On peut utiliser des meules boisseau ou des meules plates cylindriques.

Si l'on utilise une meule boisseau, le plan de travail est vertical et parallèle aux glissières qui guident le déplacement de la table.

Si l'on utilise une meule plate cylindrique, le plan de travail est horizontal et tangent inférieurement à la surface cylindrique de la meule.

Nous appellerons droite limite de meulage $\alpha\beta$, la droite tracée dans le plan de travail, tangente à la circonférence de contour extérieur de la meule et parallèle à la direction de déplacement de la table.

Dans les deux cas, la position de la meule par rapport à la table peut être réglée suivant deux directions : l'une parallèle à son axe et l'autre verticale par rapport à cet axe.

Pour affûter un outil, il faut le disposer de façon que sa face de coupe ou sa face de dépouille coïncident avec le plan de travail.

Il doit, à cet effet, être monté sur un porte-outil qui permettra de lui donner l'orientation convenable.

Afin de bien comprendre le fonctionnement de ce porte-outil et, de ce fait, la technique de l'affûtage, des notions très simples de géométrie méritent d'être exposées. Un matériel didactique réalisé en carton, bois ou tôle, facilite beaucoup la compréhension de cette étude.

## B. — Théorie de la superposition de plans par rotations

Pour affûter, il faut mettre en coïncidence une surface plane — face de coupe ou face de dépouille — avec le plan de travail de la meule horizontal (meule plate cylindrique) ou vertical (meule boisseau).

Nous allons donc étudier comment on peut rendre horizontal ou vertical un plan oblique.

1° Considérons un plan $F_e$ (*fig.* 22, vue 1). Traçons sur ce plan une droite horizontale ZZ'. Par cette droite, faisons passer le plan horizontal $P_{r1}$.

Pour faire coïncider le plan $F_e$ avec le plan $P_{r1}$, il suffit de le faire tourner d'un angle $\widehat{\gamma_e}$ qui n'est autre que l'angle de plus grande pente du plan $F_e$ par rapport au plan $P_{r1}$, c'est-à-dire l'angle que font les plans $F_e$ et $P_{r1}$.

2° Supposons maintenant que les plans $F_e$ et $P_{r1}$ ($P_{r1}$ horizontal) constituent un dièdre solide dont l'intersection ZZ' horizontale constitue un axe de rotation YY' fixe (*fig.* 22, vue 2).

Il est possible de rendre horizontal le plan $F_e$ en faisant tourner le dièdre $F_e$-$P_{r1}$ autour de l'axe YY' d'un angle égal à $\widehat{\gamma_e}$ précédemment défini.

3° Imaginons maintenant que les plans $F_e$ et $P_{r1}$ occupent la même position que précédemment, mais que l'axe de rotation YY' ne coïncide plus avec l'intersection des plans ZZ', en restant parallèle à ZZ' et dans le plan $P_{r1}$ (*fig.* 22, vue 3).

Une rotation du dièdre constitué par $F_e$ et $P_{r1}$ suffit pour rendre le plan $F_e$ horizontal (*fig.* 22, vue 4). L'angle de rotation est encore égal à $\widehat{\gamma_e}$, angle des plans $F_e$ et $P_{r1}$.

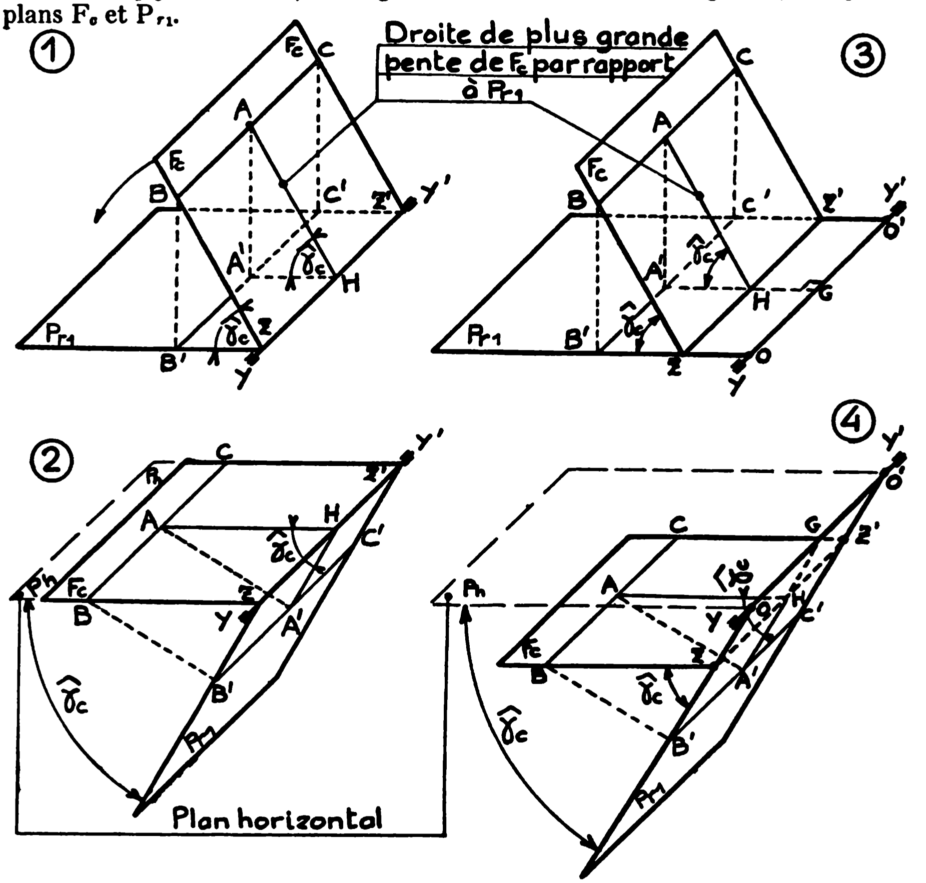



***Fig.* 22. — Mise en position horizontale d'un plan oblique, par rotation autour d'une horizontale de ce plan : *vues* 1 et 2 ; par rotation autour d'une parallèle à cette horizontale : *vues* 3 et 4.**

4° Supposons que les plans $F_e$ et $P_{r1}$ occupent initialement toujours la même position et que l'axe de rotation YY', qui reste parallèle à ZZ', intersection de $F_e$ et $P_{r1}$, ne soit plus contenu dans le plan $P_{r1}$ (*fig.* 23, vue 1).

Une rotation toujours égale à $\widehat{\gamma_e}$ suffit à rendre horizontal le plan $F_e$ (*fig.* 23, vue 2).

5° Pour rendre le plan $F_e$ vertical, il suffit de faire tourner l'ensemble, par rapport à sa position primitive, d'un angle $\frac{\pi}{2} - \widehat{\gamma_e}$ (voir *fig.* 23, vue 3).

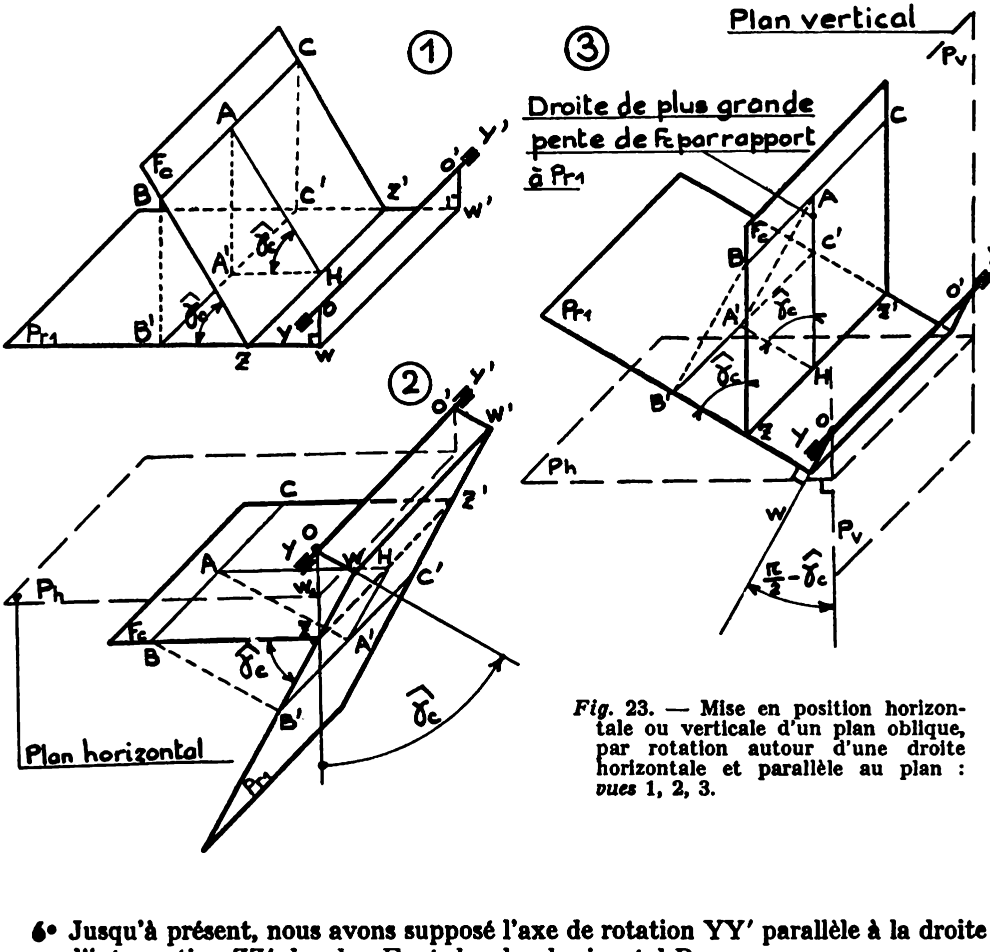



*Fig.* 23. — Mise en position horizontale ou verticale d'un plan oblique, par rotation autour d'une droite horizontale et parallèle au plan : *vues* 1, 2, 3.

6° Jusqu'à présent, nous avons supposé l'axe de rotation YY' parallèle à la droite d'intersection ZZ' du plan $F_e$ et du plan horizontal $P_{r1}$.

*Remarque :* dire que YY' est parallèle à ZZ', c'est implicitement exprimer que YY' est normal à la droite de plus grande pente AH du plan $F_e$ par rapport au plan $P_{r1}$. Si AH est perpendiculaire à YY', sa projection A'H l'est aussi.

Nous allons étudier le cas où, l'axe de rotation YY' restant horizontal, la droite d'intersection ZZ' des plans $P_{r1}$ et $F_e$ n'est plus parallèle à YY' ; la droite de plus grande pente de $P_{r1}$ par rapport à $F_e$, la droite AH et sa projection A'H ne sont plus perpendiculaires à YY' (*fig.* 24, vue 1).

Une rotation autour de YY' n'est plus suffisante pour amener le plan $F_e$ vertical ou horizontal.

Une rotation préalable est indispensable pour amener ZZ' parallèle à YY' ou, ce qui revient au même, pour rendre AH et par suite A'H perpendiculaires à YY'.

Cette rotation doit se produire autour d'un axe XX' normal au plan $F_e$. Nous désignerons par $\widehat{x}$ l'angle suivant lequel doit tourner la droite A'H pour venir coïncider avec la normale A'G à l'axe YY' (*fig.* 24, vues 1 et 2). Pendant cette rotation, l'angle $\widehat{\gamma_e}$ des plans $F_e$ et $P_{r1}$ n'a pas changé.

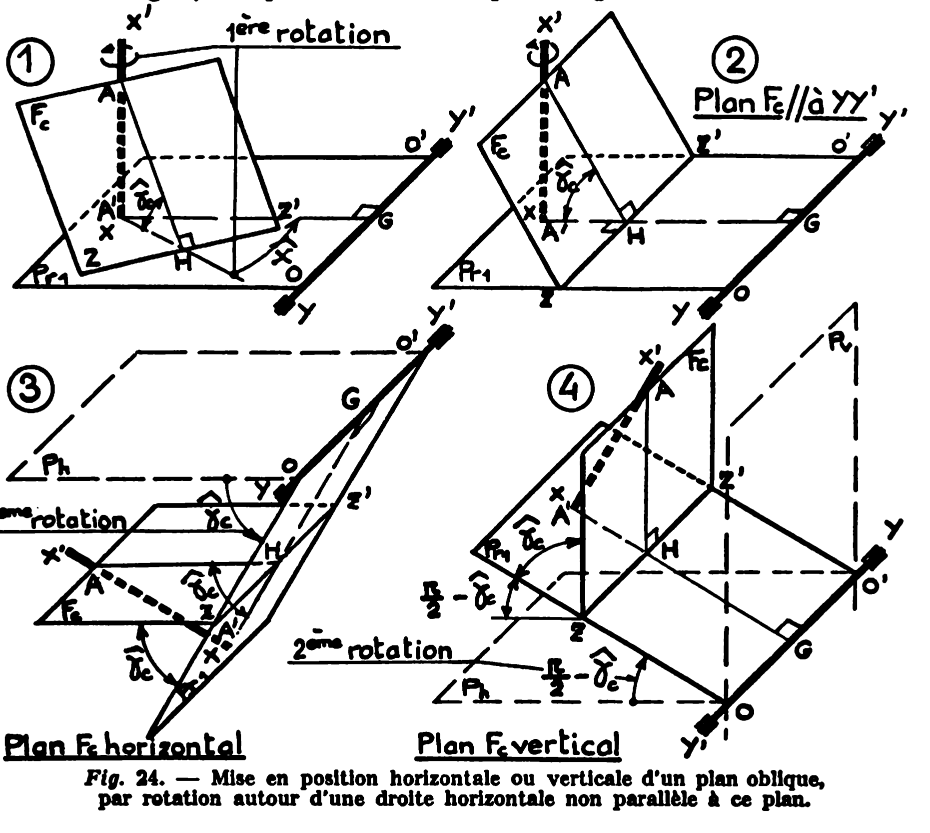



***Fig.* 24. — Mise en position horizontale ou verticale d'un plan oblique, par rotation autour d'une droite horizontale non parallèle à ce plan.**

Une deuxième rotation autour de YY' permet de placer le plan $F_e$ horizontal ou vertical (*fig.* 24, vues 3 et 4). Les angles respectifs de rotation sont $\widehat{\gamma_e}$ et $\frac{\pi}{2} - \widehat{\gamma_e}$

## 7° Conclusions.

Pour amener un plan quelconque $F_c$ dans la position verticale ou horizontale deux rotations sont indispensables :

— une rotation autour d'un axe vertical XX′ ;

— une rotation autour d'un axe horizontal YY′.

La première rotation a pour objet de rendre sa droite de plus grande pente par rapport au plan horizontal, perpendiculaire à l'axe horizontal de rotation YY′.

## C. — Mise en position de l'outil pour l'affûtage

La théorie précédente permet d'expliquer la mise en position d'affûtage des outils.

S'il s'agit d'amener la face de coupe dans le plan de travail de la meule (plan qui est horizontal ou vertical), il suffit de considérer que le plan $F_c$ contient la face de coupe (voir *fig.* 25). Le plan $P_{r1}$ est le plan de base qui doit initialement être placé horizontalement ; alors, l'angle du dièdre $F_c$ et $P_{r1}$ a pour valeur l'angle de coupe de l'outil, $\gamma_c$.

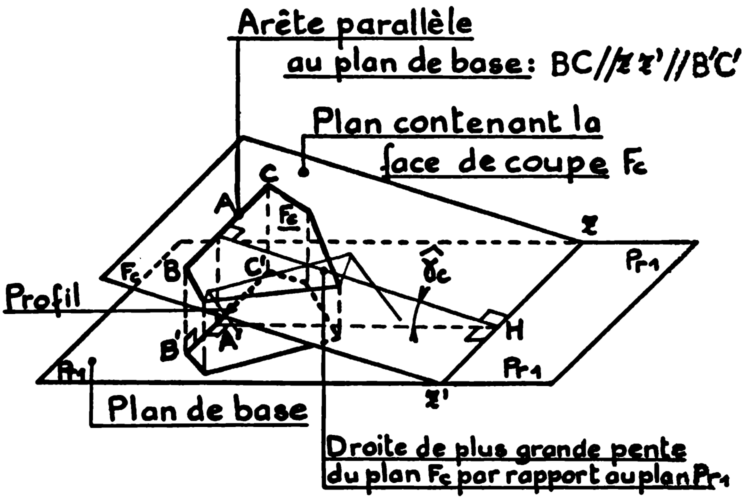



*Fig.* 25. — Mise en position horizontale de la face de coupe d'un outil.

Si l'on désire amener la face de dépouille dans le plan de travail de la meule, horizontal ou vertical, il suffit de considérer que le plan $F_d$ contient la face de dépouille (voir *fig.* 26). Le plan de base est confondu avec le plan horizontal $P_{r1}$.

L'angle du dièdre $F_d$ et $P_{r1}$ a pour valeur $\frac{\pi}{2} - \widehat{\alpha_a}$ ($\widehat{\alpha_a}$ étant l'angle de dépouille).

La droite AE est la droite de plus grande pente de la face de dépouille par rapport au plan de base.

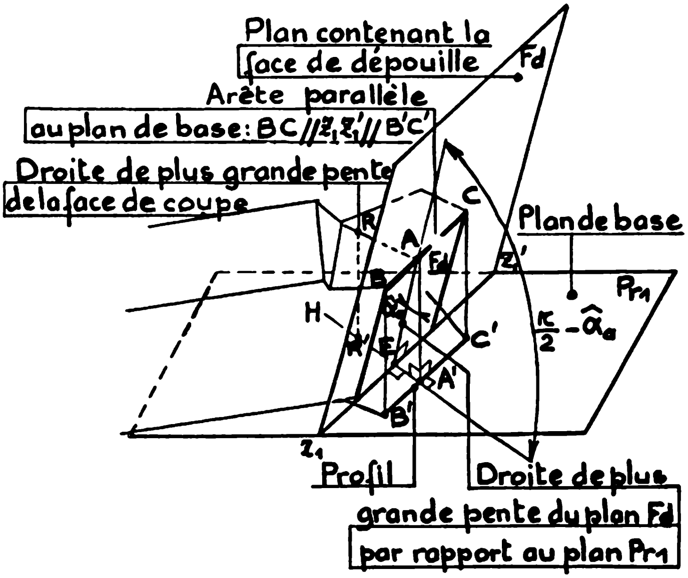



*Fig.* 26. — Mise en position horizontale de la face de dépouille d'un outil.

Dans les deux cas, puisque l'outil est supposé à inclinaison d'arête nulle $\lambda = 0$, l'arête est parallèle à l'intersection ZZ' de $F_e$ et de $P_{r1}$.

## D. — Application à la mise en place d'un outil pour l'affûtage

Supposons un outil à charioter à droite dont la base est sur un plan horizontal $P_{r1}$ (voir *fig.* 27).

Nous nous proposons d'affûter cet outil avec une meule plate cylindrique à axe horizontal. Le plan de travail de cette meule est horizontal.

Pour meuler la face de coupe, il est nécessaire de l'amener dans un plan horizontal. On fera ensuite coïncider le plan de travail de la meule avec ce plan horizontal en agissant sur les dispositifs de réglage en position de la meule.

Pour rendre horizontale la face de coupe, nous avons vu que deux rotations sont nécessaires : l'une autour d'un axe vertical XX' et l'autre autour d'un axe horizontal YY'.

Nous supposons YY' perpendiculaire aux génératrices de l'outil. Soit $P_{r1}$ le plan de base, A'H la normale au profil, projection de la droite de plus grande pente AH.

L'angle $\widehat{AHA'}$ est l'angle de coupe $\widehat{\gamma_c}$ ; l'angle $\widehat{D'F'H}$ est l'angle de direction $\chi$.

Nous avons tracé la droite de plus grande pente AH qui coupe l'axe XX'. Si R est l'intersection de XX' avec AH, *r* sera l'intersection de cet axe avec A'H.

L'intersection de la face de coupe avec le plan de base $P_{r1}$ est ZZ' : A'H est perpendiculaire à ZZ'.

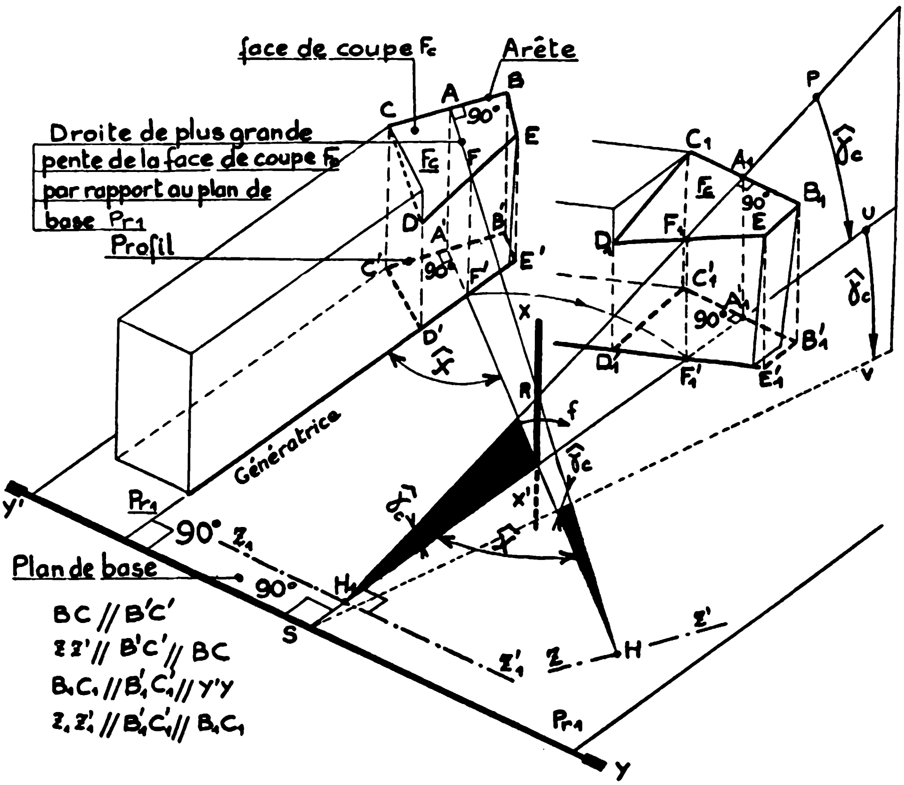



*Fig.* 27. — **Rotations indispensables pour amener la face de coupe de l'outil dans un plan horizontal, en vue de son affûtage.**

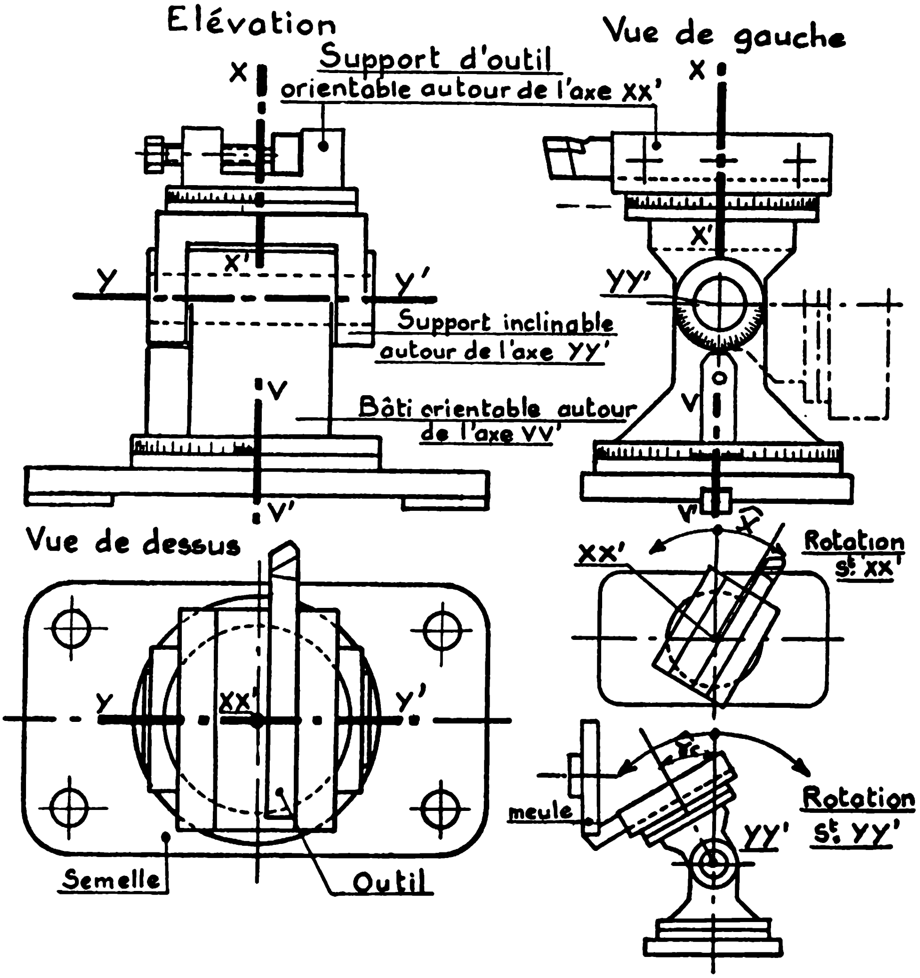



*Fig.* 28. — Schéma d'un support d'outil orientable pour machine à affûter : rotations indispensables pour amener la face de coupe de l'outil dans le plan de travail horizontal de la meule.

Une rotation autour de XX′ d'un angle $\widehat{x}$ amène la droite A′H en $A'_1H_1$ perpendiculaire à l'axe YY′, puisque nous avions au préalable disposé les génératrices de l'outil normales à YY′.

De ce fait ZZ′ vient en $Z_1Z'_1$, parallèle à YY′.

Une rotation de l'outil, d'un angle $\widehat{\gamma_c}$ autour de $Z_1Z'_1$, amène la face de coupe dans le plan $P_{r1}$.

Une rotation, d'un angle $\widehat{\gamma_c}$ autour de YY′, parallèle à $Z_1Z'_1$, amènera évidemment la face de coupe dans un plan horizontal (c'est une application de ce qui a été montré sur la *figure* 22, vues 3 et 4).

L'axe YY′ peut fort bien ne pas se trouver sur le plan de base, mais rester horizontal. La deuxième rotation, d'un angle $\widehat{\gamma_c}$, conduirait la face de coupe dans un plan horizontal.

*Remarque* : Si la deuxième rotation se faisait en sens inverse d'un angle $\frac{\pi}{2} - \widehat{\gamma_c}$ la face de coup serait verticale.

## E. — Le support d'outil orientable pour machines à affûter

**Nous donnons sur la *figure* 28 le schéma d'un support orientable. Il représente la vue d'un matériel de démonstration qui pourrait être exécuté.**

**Il comprend :**

- **— un support d'outil orientable autour d'un axe vertical XX′ ;**
- **— un support inclinable autour d'un axe horizontal YY′ ;**
- **— un bâti orientable autour d'un axe VV′ vertical ;**
- **— une semelle fixée sur la table de la machine et dégauchie au moyen de lardons pouvant être introduits dans la rainure longitudinale de la table.**

**L'outil est disposé dans le support orientable, les génératrices perpendiculaires à l'axe horizontal YY′ (voir *fig.* 28).**

**La rotation, d'un angle $\widehat{x}$, s'effectue autour de l'axe XX′.**

**La rotation, d'un angle $\widehat{\gamma_c}$, s'effectue autour de l'axe YY′ lorsqu'il s'agit d'affûter la face de coupe.**

## 1° Affûtage d'un outil sur une machine comportant une meule plate cylindrique.

### a) *Affûtage de la face de coupe.*

Le plan de travail de la meule est horizontal. La *figure* 29 représente la suite des opérations. Au départ, l'outil est placé de façon que ses génératrices soient parallèles à l'axe de rotation de la meule.

— On produit la rotation $r_1$ autour de XX', d'un angle $\widehat{x}$. Elle a pour effet de rendre la projection de la droite de plus grande pente AH normale à YY'.

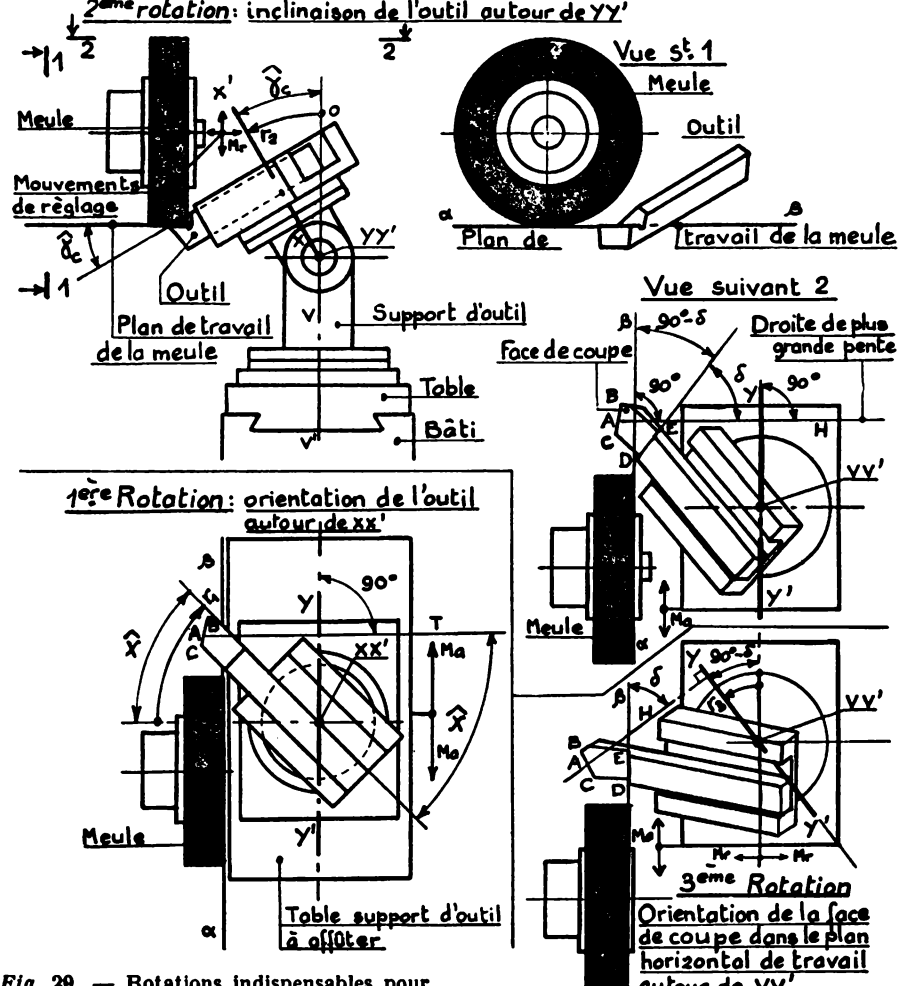



*Fig.* 29. — Rotations indispensables pour amener la face de coupe de l'outil dans le plan de travail horizontal de la meule.

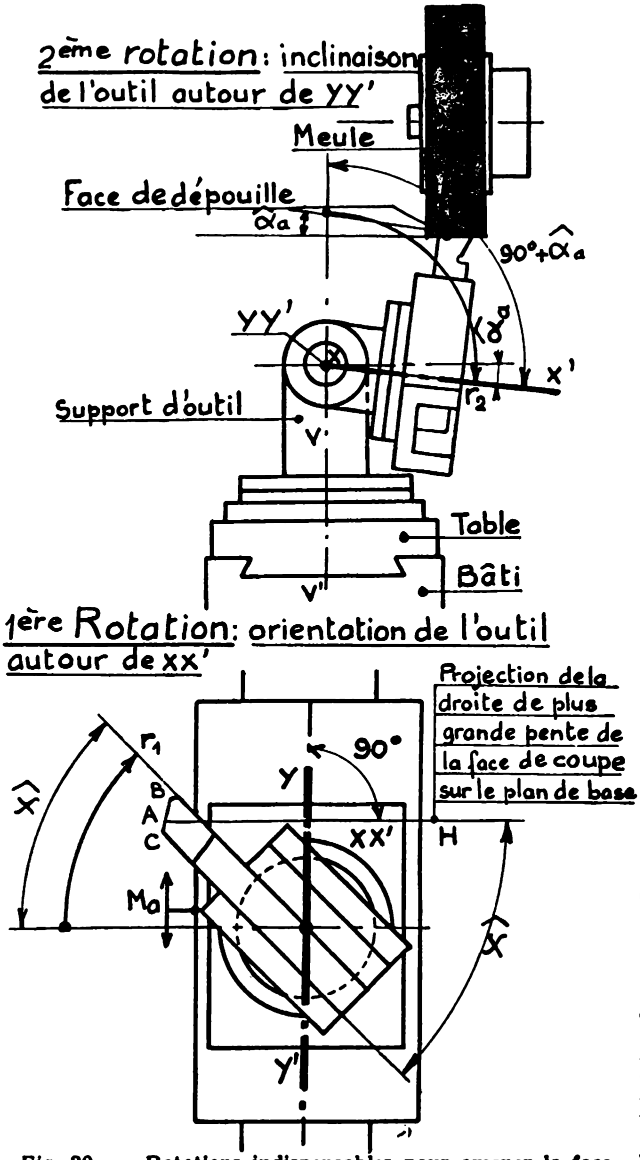



*Fig.* 30. — Rotations indispensables pour amener la face de dépouille de l'outil dans le plan de travail horizontal de la meule.

— On exécute la rotation $r_2$ autour de l'axe horizontal YY' d'un angle $\widehat{\gamma_c}$.

La face de coupe de l'outil est dans le plan horizontal.

— On règle la position de la meule suivant M*r* pour amener le plan de travail sur la face de coupe de l'outil.

Dans cette position, comme l'indique la vue 2, la partie meulée est celle qui est pointillée.

— Si l'on souhaite meuler toute la face de coupe, une troisième rotation $r_3$ est nécessaire autour d'un axe vertical VV', de façon que la face de coupe reste dans un plan horizontal.

Si le côté DE de la face de coupe fait avec la droite de plus grande pente AH un angle $\widehat{\delta}$, on fera tourner le bâti d'un angle égal à $90° - \widehat{\delta}$.

Ainsi, après réglage suivant M*r*, on aura rendu le côté DE en coïncidence avec la droite limite de meulage $\alpha\beta$.

**b) *Affûtage de la face de dépouille.***

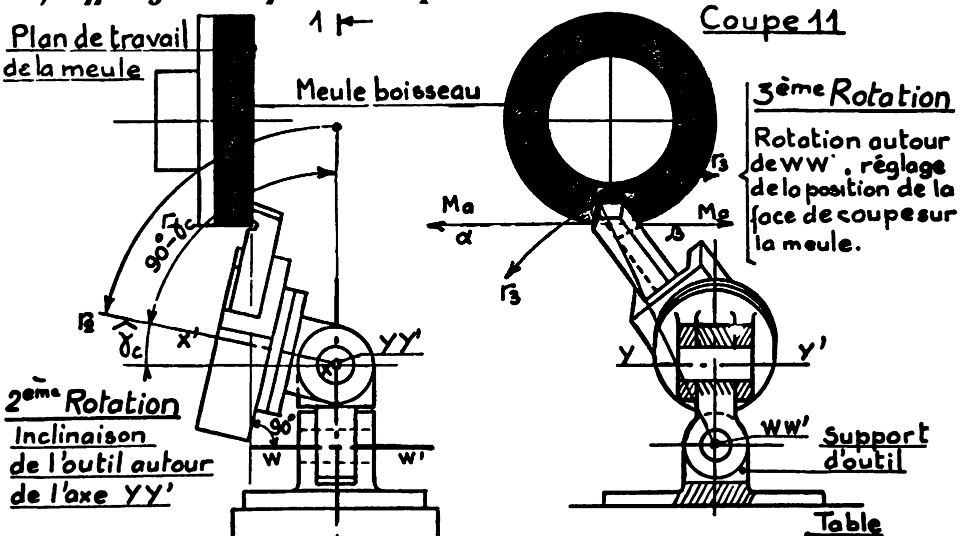
Deux rotations sont encore indispensables (voir *fig.* 30) :

— une rotation $r_1$ autour de l'axe vertical XX', égale à un angle $\widehat{x}$ ;

— une rotation autour de l'axe horizontal YY', égale à un angle $90° + \widehat{\alpha_a}$.

## 2° Affûtage d'un outil comportant une meule boisseau.

**a)** ***Affûtage de la face de coupe.***



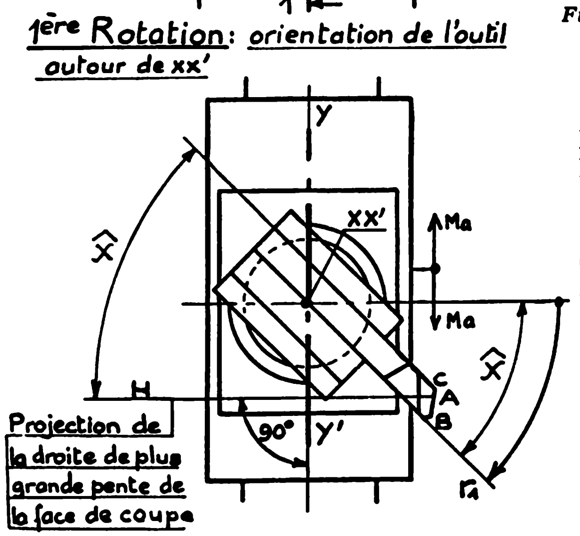




*Fig.* 31. — **Rotations indispensables pour amener la face de coupe de l'outil dans le plan de travail vertical d'une meule boisseau.**

**Le plan de travail de la meule boisseau est vertical (voir *fig.* 31).**

**Pour amener la face de coupe dans ce plan, deux rotations sont indispensables :**

**— une rotation $r_1$ autour de l'axe vertical XX', d'un angle $\widehat{x}$, pour rendre la projection AH de la droite de plus grande pente sur le plan de base, perpendiculaire à l'axe horizontal YY' ;**

**— une rotation $r_2$ de l'ensemble support-outil autour d'un axe horizontal YY' d'un angle 90° — γ .**

**Si l'on veut régler la position de l'arête tranchante par rapport à la droite limite de meulage αβ, une troisième rotation $r_3$ est nécessaire.**

Cette rotation de l'outil doit se faire par rapport à un axe perpendiculaire au plan vertical de travail, puisque la face de coupe doit rester verticale. C'est l'axe horizontal WW' ; il est perpendiculaire à YY'.

**b) *Affûtage de la face de dépouille.***

Deux rotations sont encore nécessaires pour amener la face de dépouille dans le plan de travail :

— une rotation d'un angle $\widehat{x}$ autour de l'axe vertical XX' ;

— une rotation $r_2$ autour de l'axe YY' (*fig.* 32), pour amener la face de dépouille dans le plan de travail. L'angle de rotation a pour valeur $\widehat{\alpha_a}$.

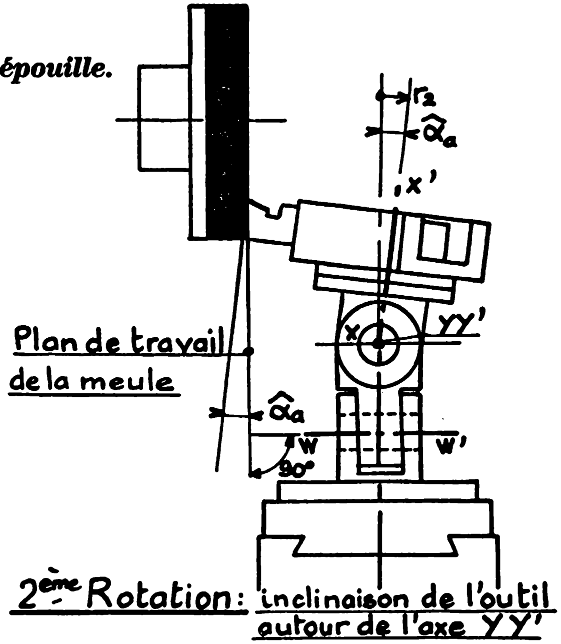



*Fig.* **32. — Rotations indispensables pour amener la face de dépouille de l'outil dans le plan de travail vertical d'une meule boisseau.**

Sur beaucoup de machines prévues pour affûter la face de dépouille des outils, la table-support peut être inclinée d'un angle $\widehat{\alpha_a}$. Une réglette servant à diriger l'outil est inclinée d'un angle $\widehat{x}$ par rapport à la normale AH à la droite YY', parallèle au plan de travail (voir *fig.* 33).

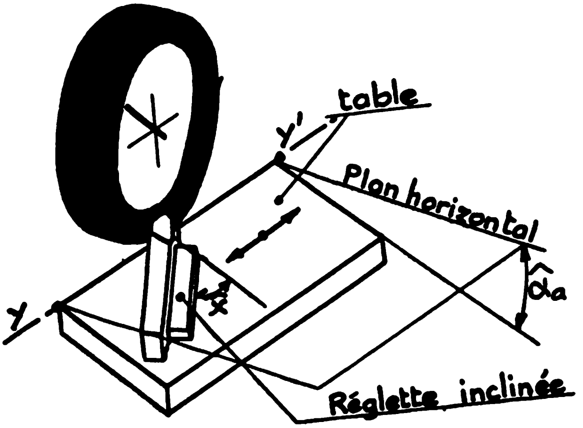



*Fig.* **33. — Affûtage de la face de dépouille d'un outil sur meule boisseau avec support d'outil inclinable.**

## DIMENSIONS DU COPEAU

### A. — Tournage

Considérons un outil à charioter en position de travail (*fig.* 34). Lorsque la pièce fait un tour, l'arête tranchante vient de MN en M'N'.

La distance NN' = *a* est appelée **avance par tour,** la différence *p* entre les rayons de la pièce brute et de la partie usinée, **profondeur de passe.**

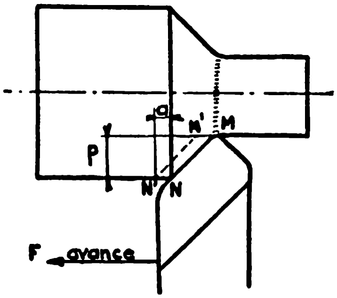



*Fig.* 34. — Dimensions du copeau de tournage.

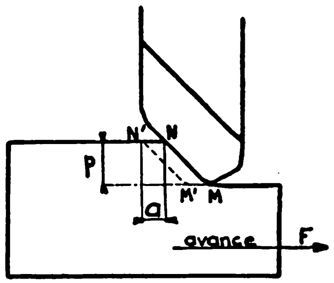



*Fig.* 35. — Dimensions du copeau de rabotage.

### B. — Rabotage

La *figure* 35 représente un outil d'étau-limeur au travail. L'avance par coup *a* et la profondeur de passe *p* se définissent comme pour le chariotage au tour.

### C. — Section du copeau

La section du copeau étant sensiblement un parallélogramme, sa surface est égale à $p \times a$.

## ÉTAT DES SURFACES USINÉES

### A. — Travail des outils à un seul tranchant

Il est bien évident qu'en matière d'usinage, on cherche à obtenir des surfaces se rapprochant *le* plus possible des surfaces théoriques : plan, cylindre, cône, etc.

Or, on constate que les surfaces usinées à l'outil présentent des sillons rectilignes s'il s'agit de rabotage, et hélicoïdaux s'il s'agit de tournage.

Nous allons rechercher les conditions de travail permettant d'obtenir, sur la surface de la pièce, des sillons de profondeur minimum. Cette étude sera faite dans le cas du rabotage à l'étau-limeur. Évidemment, les conclusions demeurent identiques pour un chariotage au tour.

La *figure* 36 représente l'outil à la fin du premier coup (en pointillé, la pièce au cours du deuxième coup).

La *figure* 37 montre l'outil à la fin du quatrième coup :

*a*) L'avance par coup étant *a*, et l'angle de direction d'arête de l'outil $\varkappa_1$, la profondeur des aspérités est *h*. On suppose aiguë l'extrémité de l'outil.

*b*) Tout en conservant la même avance par coup et la même acuité de la pointe, on prend un outil qui présente un angle de direction d'arête $\widehat{\varkappa_2}$ plus petit. On constate que la profondeur des sillons $h_1$ a diminué :

$$h_1 < h \text{ (voir } \textit{fig. } 37).$$

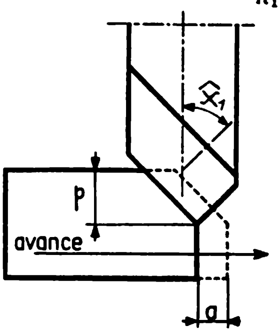



*Fig.* 36. — État des surfaces usinées à la fin du premier coup d'outil de rabotage.

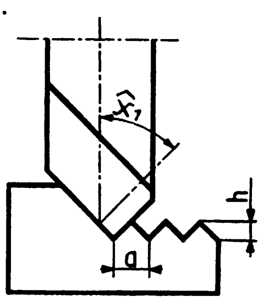



*Fig.* 37. — État de la surface rabotée à la quatrième passe.

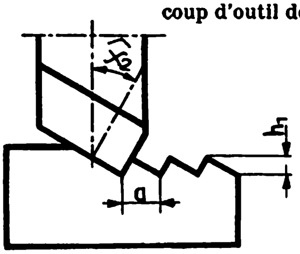



*Fig.* 38. — Diminution de la profondeur des sillons quand l'angle de direction d'arête diminue.

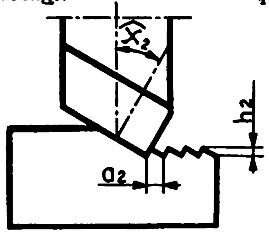



*Fig.* 39. — Diminution de la profondeur des sillons quand l'avance par coup diminue.

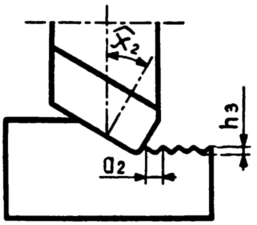



*Fig.* 40. — Diminution de la profondeur des sillons quand l'extrémité de l'outil est arrondie.

*c*) Si l'on utilise le même outil avec une avance par coup $a_2$ plus faible, $a_2 < a$, on constate (*fig.* 39) que la profondeur des sillons a encore diminué ; on a : $h_2 < h_1 < h$.

*d*) Enfin, en arrondissant l'extrémité de l'outil, on constate que les aspérités sont devenues beaucoup moins importantes ; on a : $h_3 < h_2 < h_1 < h$ (*fig.* 40).

Conclusions.

Pour les travaux de finition, on prend un outil ayant un faible angle de direction d'arête (30°), un grand arrondi de pointe, et l'on choisit une avance minimum par coup ou par tour. Signalons que l'utilisation de l'outil-pelle ayant un angle de direction d'arête nul permet d'obtenir un état de surface très satisfaisant. Mais avec un tel outil, on ne peut prendre que de très petites profondeurs de passe et la mise en place est assez délicate : il est nécessaire d'incliner très légèrement l'arête tranchante par rapport aux génératrices de la surface usinée.

## B. — Travail des outils à tranchants multiples

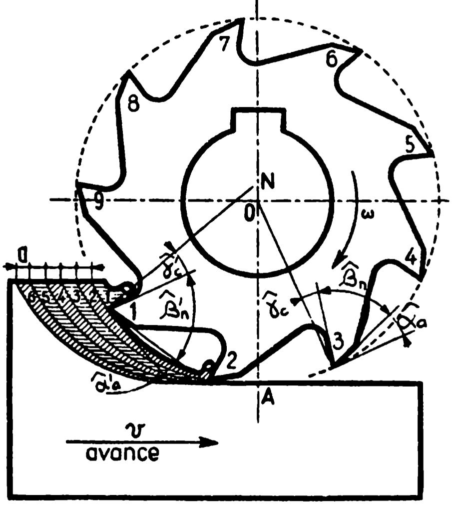



*Fig.* 41. — Mode d'action d'un outil à tranchants multiples.

Étudions le travail d'une fraise produisant une surface plane (*fig.* 41). Elle est animée d'un *mouvement de coupe*, la rotation ω, tandis que la pièce se déplace suivant *v* : *mouvement d'avance.*
Chaque dent travaille comme un outil simple tournant autour de O. Le copeau produit n'est pas d'épaisseur uniforme. En raison de la combinaison des mouvements ω et *v*, chaque arête tranchante trace sur la pièce un arc de cycloïde. L'épaisseur maximum du copeau à la partie supérieure correspond à l'*avance par dent* : *a*. Soient *n*, le nombre de dents de la fraise et A, l'avance de la pièce correspondant à un tour de fraise, on a : $A = n \times a$.

Si, par exemple, l'avance par dent est de 0,1 mm pour une fraise de neuf dents, l'avance par tour sera de $A = 9 \times 0{,}1 = 0{,}9$ mm,
Quand la dent 3 viendra en contact avec la pièce, les angles caractéristiques seront $\widehat{\gamma_c}$, $\widehat{\beta_n}$, $\widehat{\alpha_a}$.
Lorsque la dent sera engagée, comme c'est le cas pour la dent 1, le profil de la pièce n'étant plus un arc de cercle, mais un arc de cycloïde, la normale 1N ne passera plus par O et l'angle de dépouille diminuera : $\widehat{\alpha'_a} < \widehat{\alpha_a}$, tandis que $\widehat{\gamma_c}$ deviendra plus grand que $\widehat{\gamma'_c}$.

La variation des angles $\widehat{\alpha_a}$ et $\widehat{\gamma_c}$ est sans conséquence pour le travail de la fraise, car l'avance par tour *a* est faible.
La surface obtenue présente de légères ondulations dont l'amplitude dépend à la fois de l'avance par tour, du diamètre de la fraise et de la flexion de l'arbre porte-fraise. Pour diminuer l'importance de la profondeur des ondulations, il faut choisir des fraises de grand diamètre avec une petite avance par dent, et surtout bien soutenir l'arbre porte-fraise pour l'empêcher de fléchir.

# COPEAU TAILLÉ MINIMUM

Un *outil tranchant* ne peut produire un copeau dont l'épaisseur serait inférieure à un minimum dépendant de la finesse de l'arête. Le plus petit copeau que peut exécuter un outil est appelé *copeau taillé minimum.*

**Les outils d'ébauche,** affûtés sur des meules à gros grains, peuvent produire un copeau taillé minimum de 0,15 mm.

**Les outils de finition,** dont l'arête a été avivée à la pierre à huile, peuvent tailler des copeaux de 0,05 mm d'épaisseur.

Si, par exemple, on donne une avance par tour de 0,05 mm à un outil à charioter dont le copeau taillé minimum est de 0,10 mm, l'outil coupe un tour sur deux. Pendant le tour où l'outil ne coupe pas, il y a un frottement intense de la pièce sur l'arête tranchante. Celle-ci s'use rapidement, s'arrondit et ne taille plus le métal. Il faut *réaffûter* l'outil.

Lorsque l'épaisseur offerte à l'outil est voisine de celle du copeau taillé minimum, il y a frottement important du métal travaillé sur la pointe de l'outil. L'effort de coupe augmente, l'arête tranchante s'émousse rapidement. Il est donc intéressant de produire un copeau d'épaisseur maximum, compte tenu de la puissance de la machine et de l'état de surface désiré.

On admet comme épaisseur de copeau minimum :

- 0,1 mm pour les travaux de finition ;
- 0,2 mm pour les travaux d'ébauche.

Pour les travaux de fraisage où l'épaisseur du copeau débute à zéro, on a intérêt à utiliser des fraises très bien affûtées et à donner une avance par dent assez grande ; une avance par dent de 0,15 mm est couramment utilisée.

**Application.**

***Une fraise comporte 12 dents. Quelle est l'avance par tour à adopter ?***

Si l'avance par dent est prise égale à 0,15 mm, l'avance par tour sera de

$$0{,}15 \times 12 = 1{,}8 \text{ mm.}$$

◇

# Efforts résultant de la coupe du métal

## ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

### 1° Actions mutuelles de contact.

**a)** J'appuie avec l'extrémité d'un crayon sur la paume de ma main. Le crayon exerce un effort sur ma main. La paume de ma main se creuse : elle se déforme (*fig.* 1). Chaque fois que la paume de ma main s'aplatit au contact d'un corps, ce corps exerce une action sur elle.

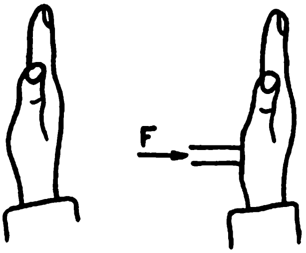



*Fig.* 1. — Un effort F, appliqué à la paume de la main, produit une déformation par écrasement du muscle.

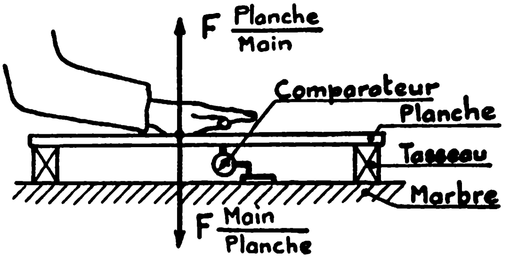



*Fig.* 2. — Efforts mutuels de la main sur la planche et de la planche sur la main.

**b)** J'exerce avec la main une action verticale sur une planche supportée par deux tasseaux (*fig.* 2) ; la force exercée par ma main sur la planche peut être représentée par un vecteur dirigé vers le bas et dont la longueur représente l'intensité de mon action mesurée en newtons ou en kilogrammes-force (1 kgf $\simeq$ 10 N). Désignons cette force par $F_{\frac{\text{main}}{\text{planche}}}$.

Mais la paume de ma main s'est aplatie. En nous référant au paragraphe précédent, nous sommes conduits à admettre que la planche exerce sur la main une action $F_{\frac{\text{planche}}{\text{main}}}$. Ces deux actions sont égales et directement opposées. S'il n'en était pas ainsi, il y aurait un mouvement de la planche dont les supports s'enfonceraient dans le sol, ou de la main qui se trouverait soulevée.

Il est intéressant de noter que, sous l'action de ma main, la planche s'est déformée, comme pourrait en témoigner un comparateur dont le support n'aurait aucun point commun avec la table.

Les deux forces $F_{\frac{\text{main}}{\text{planche}}}$ et $F_{\frac{\text{planche}}{\text{main}}}$ sont les actions mutuelles de contact de la main et de la planche.

Nous remarquerons ici que la main est motrice ; l'action $F_{\frac{\text{planche}}{\text{main}}}$ n'existe que si l'effort $F_{\frac{\text{main}}{\text{planche}}}$ s'est manifesté. L'action de contact d'un corps A sur un corps B est dirigée vers l'intérieur de B.

### c) *Conclusions.*

— Quand deux corps sont en contact, il existe deux actions de contacts qui sont égales et directement opposées.

— Lorsqu'un corps est soumis à l'action d'un autre corps, il y a déformation de l'un et l'autre corps.

## 2° Actions mutuelles de contact de l'outil sur la pièce.

### a) *Déformation d'un corps soumis à un effort.*

Complétons l'expérimentation élémentaire précédente afin d'apporter quelques précisions supplémentaires relatives à l'intensité des actions mutuelles de contact. Imaginons une barre cylindrique ou rectangulaire, fixée solidement entre les mâchoires d'un étau (*fig.* 3).

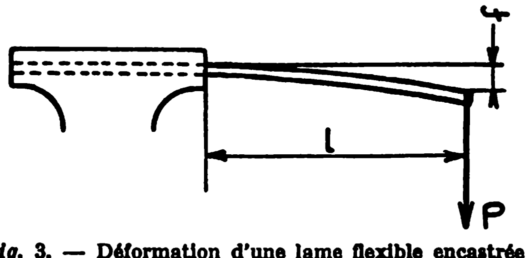



*Fig.* 3. — Déformation d'une lame flexible encastrée à une extrémité.

A l'extrémité de la barre qui se trouve en porte-à-faux, nous accrochons un poids P. La pièce fléchit, et un comparateur permet de mesurer la flèche $f$.

Si on dispose des poids ayant successivement pour valeur 2P, 3P, 4P,... les flèches correspondantes deviennent $2f$, $3f$, $4f$...

**Les flèches sont proportionnelles aux efforts si la distance $l$ de l'effort à l'appui reste constante.**

Pour un même effort P, la flèche diminue quand la distance $l$ diminue (*fig.* 4). On constate et on démontre que si $l_1 = \frac{l}{2}$, on a $f_1 = \frac{f}{2^3} = \frac{f}{8}$ ou, en généralisant, si $l_1 = \frac{l}{k}$, on a $f_1 = \frac{f}{k^3}$.

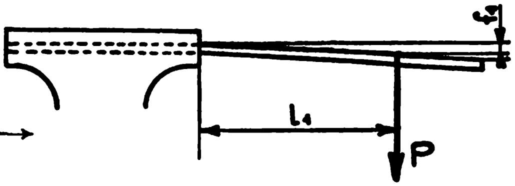
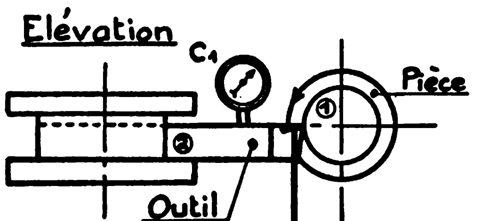



*Fig.* 4. — L'effort s'est rapproché de l'encastrement ; la flèche $f_1$ a diminué : $f_1 = f \cdot \frac{l_1}{l}$.

## b) *Étude expérimentale des actions de contact de la pièce sur l'outil.*

Utilisons un tour comme machine-outil ; le métal travaillé est de l'acier XC 35 ; l'outil, de section carrée, est un outil coudé à charioter à droite (NF. 66 312), dont l'angle de direction est de 45°. Des comparateurs montés sur le traînard permettent de mesurer les déformations prises par l'outil (*fig.* 5). Prenons une passe de profondeur $p = 4$ et une avance par tour $a = 0,4$ ; la section du copeau est de $4 \times 0,4 = 1,6$ mm².



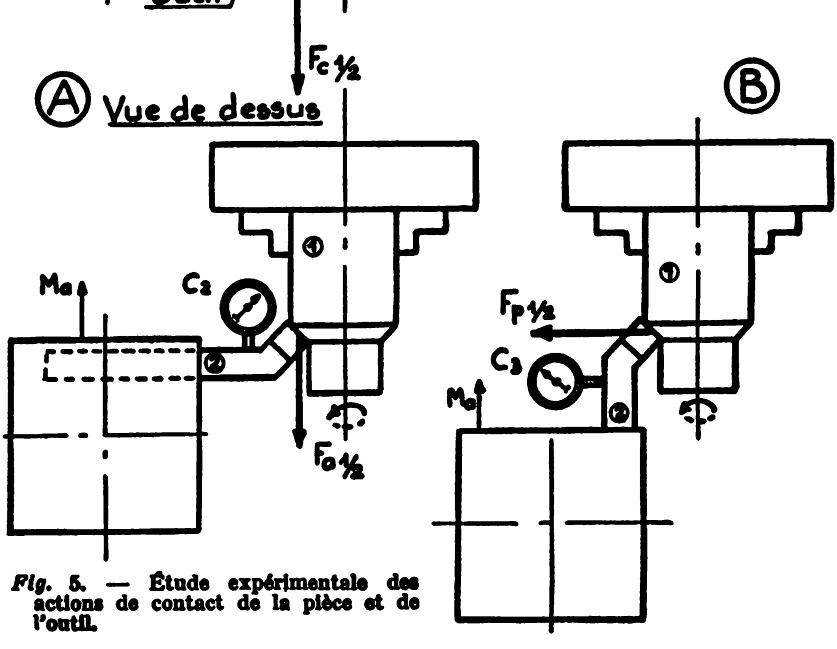




*Fig.* 5. — Étude expérimentale des actions de contact de la pièce et de l'outil.

Mettons en route et examinons le comparateur $C_1$.

Son aiguille dévie périodiquement entre 4 et 24, puis de 24 à 4, de 4 à 24, et ainsi de suite.

On peut donc interpréter ces résultats comme suit :

1° Puisque la flèche, dans le plan vertical, est toujours de même sens, l'effort de la pièce sur l'outil ($F_{c\,1/2}$) est aussi de même sens. Il est dirigé vers le bas, dans le sens du vecteur vitesse de rotation de la pièce.

2° La flèche étant variable en grandeur, l'effort $F_{c\,1/2}$ est aussi variable.

3° L'action de l'outil sur la pièce $F_{c\,2/1}$ est égale et de sens contraire à $F_{c\,1/2}$. Elle est donc variable et la flèche prise par la pièce dans le plan vertical est constamment variable.

Examinons le comparateur $C_2$.

Son aiguille dévie de 2 à 10 divisions, puis de 10 à 2, de 2 à 10, et ainsi de suite. Nous en tirons des conclusions semblables à celles du paragraphe précédent.

L'effort $F_{a\,1/2}$ est toujours dirigé dans le même sens et varie constamment : puisque l'outil est à section carrée, ses flèches sont comparables dans les deux plans, vertical et horizontal. La flèche maximum due à $F_{a\,1/2}$ étant plus faible que la flèche maximum due à $F_{c\,1/2}$, il s'ensuit que $F_{a\,1/2}$ est plus petit que $F_{c\,1/2}$. On a sensiblement : $\frac{F_a}{F_c} = \frac{10}{24}$.

On peut se demander s'il n'y a pas un effort dirigé suivant l'axe de l'outil. Comme il ne peut être mis en évidence avec l'outil occupant la position décrite précédemment, on est conduit à effectuer un montage différent. On utilise un outil semblable au précédent, mais à gauche et disposé avec le même porte-à-faux, tel qu'il est représenté sur la *figure* 5 (vue B).

Les indications du comparateur mettent en évidence un effort $F_{p\,1/2}$, en tous points semblable à l'effort $F_{a\,1/2}$, à la direction près. Les trois efforts sont désignés comme suit :

| | | | |
|---|---|---|---|
| $F_{c\,1/2}$ | ou plus simplement | $F_c$ | effort de coupe, |
| $F_{a\,1/2}$ | — | — $F_a$ | effort d'avance, |
| $F_{p\,1/2}$ | — | — $F_p$ | effort de pénétration. |

### c) *Variation de Fc, Fa, Fp avec la section du copeau.*

Diminuons de moitié la section du copeau en prenant $p = 4$ et $a = 0{,}2$, ou $p = 2$ et $a = 0{,}4$. On a, dans les deux cas, une section de copeau :

$$s = 4 \times 0{,}2 = 2 \times 0{,}4 = 0{,}8 \text{ mm}^2.$$

On constate que les déviations des comparateurs sont réduites de moitié. Les efforts $F_c$, $F_a$, $F_p$ sont réduits de moitié par rapport à ceux de la première expérience.

Si on multiplie l'expérience avec des sections de copeaux égales à une fraction ou un multiple de la section initiale, on trouve que **les efforts $F_c$, $F_a$, $F_p$, sont proportionnels aux sections de copeau : $F_c = k_1 S$ ; $F_a = k_2 S$ ; $F_p = k_3 S$.**

**d) *Variation de Fc, Fa, Fp avec l'angle de direction.***

Faisons varier l'angle de direction de l'outil (*fig.* 6). Si nous conservons la même section de copeaux, la même dimension de l'outil, nous pouvons expérimentalement démontrer que, pour un même métal travaillé et quel que soit l'outil, nous avons $F_c$ sensiblement constant.

Par contre, $F_a$ croît avec l'angle de direction et $F_p$ décroît avec ce même angle.

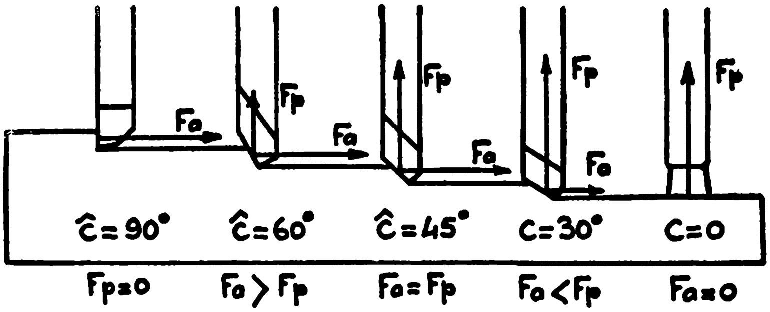



*Fig.* 6. — Variation de $F_a$ et $F_p$ avec l'angle de direction.

On a

| | | |
|---|---|---|
| *Outil pelle*........ | $\hat{c} = 0$ | $F_a \simeq 0.$ |
| *Outils à charioter* | $\hat{c} = 30°$ | $F_a < F_p$ |
| | $\hat{c} = 45°$ | $F_a \simeq F_p$ |
| | $\hat{c} = 60°$ | $F_a > F_p$ |
| *Outil couteau* ..... | $\hat{c} = 90°$ | $F_p \simeq 0$ |

Dans tous les cas : $F_c > F_a$ ou $F_p$.

**e) *Variation de Fc, Fa, Fp avec la nature du métal travaillé.***

Nous maintiendrons constants les facteurs caractéristiques de la première expérience : l'outil, son porte-à-faux, la section du copeau, la position des comparateurs. Remplaçons la pièce primitivement en acier doux (désignation C 30 ; résistance à la rupture $(Rr)_e$ = 400 N/mm²) par de l'acier demi-dur (C 45 ; $(Rr)_e$ = 600 N/mm²) et par de l'acier dur (C 70 ; $(Rr)_e$ = 750 N/mm²).

Nous constatons que les efforts dus à la coupe augmentent avec la résistance à la rupture. Ils sont sensiblement proportionnels aux valeurs de $(Rr)_e$. Si l'on remplaçait la pièce primitivement en acier par des pièces en fonte, duralumin, laiton, on trouverait, pour les mêmes conditions de travail, des valeurs d'efforts différentes, n'ayant pas nécessairement de relation avec la résistance à la rupture du métal.

Nous pouvons conclure cette étude élémentaire par l'observation suivante : les efforts dus à la coupe dépendent de la nature du métal travaillé.

**f) *Efforts de l'outil sur la pièce.***

Les efforts égaux et opposés aux actions $F_{c1/2}$, $F_{a1/2}$ et $F_{p1/2}$ de la pièce sur l'outil constituent les actions de l'outil sur la pièce : $F'_{c2/1}$, $F'_{a2/1}$ et $F'_{p2/1}$ (voir *fig.* 7).

## THÉORIE DE LA FORMATION DU COPEAU

C'est l'ingénieur anglais Nicholson qui, le premier, a expliqué comment se forme le copeau dans l'acier demi-dur. L'outil qu'il a employé était monté sur un équipage dynamométrique, permettant de mesurer les efforts exercés par la pièce sur l'outil, suivant trois directions orthogonales.

Les *figures* 8, 9, 10 et 11 permettent de suivre la formation du copeau. Les *figures* 8 et 9 montrent qu'il y a d'abord compression du métal sur la face de coupe. La pression du copeau sur l'outil va en augmentant ; une légère crique se produit alors en A ; elle augmente rapidement d'importance, tandis que l'effort supporté par l'outil diminue brusquement (*fig.* 10). A nouveau le métal vient se comprimer sur la face de coupe et le phénomène se reproduit dans les mêmes conditions.

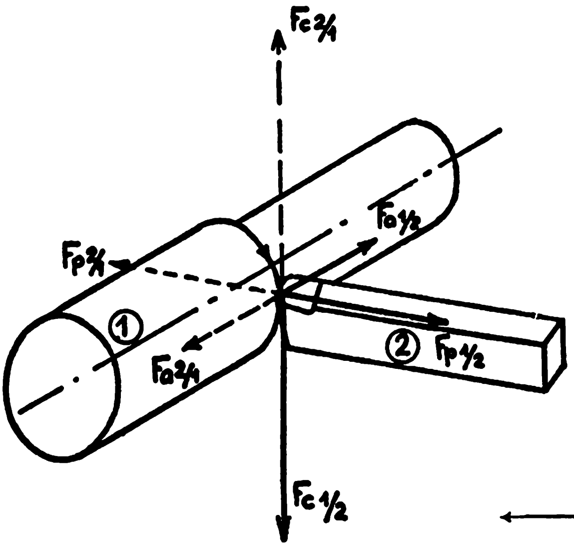



**Fig. 7. — Actions de la pièce sur l'outil et de l'outil sur la pièce.**

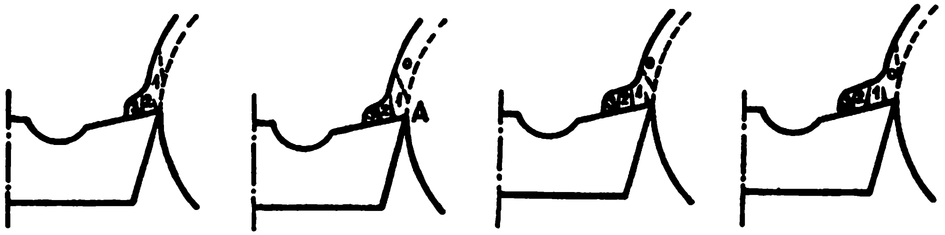



**Fig. 8.** **Fig. 9.** **Fig. 10.** **Fig. 11.**

**Fig. 8 à 11. — Différentes phases de la formation du copeau.**

Les prises de vues cinématographiques comportant un très grand nombre d'images par seconde ont confirmé ce phénomène en révélant que, sous l'effet de la compression, le métal se trouve littéralement broyé.

Lorsque le métal usiné est très malléable, de l'acier doux par exemple, ce métal ainsi divisé et comprimé se soude sur la pointe de l'outil. C'est le *copeau adhérent.* Il rend difficile l'usinage des aciers très malléables.

Conclusions.

a) **L'action de la pièce sur l'outil est essentiellement variable et périodique :** la période de variation correspond à la partie dentelée du copeau.
Pour les *métaux friables* la période du phénomène est très courte. Dans le cas du travail de *métaux tendres,* taillés avec des outils à grande pente, les variations de l'effort de coupe sont très faibles.

b) **La pression exercée par le copeau sur la face de coupe,** correspondant aux positions des *figures* 8 et 9, **fait naître une force de frottement** qui tend à séparer l'outil de la pièce.

c) Par suite de ce frottement, **la face de coupe subit une érosion** progressive.

d) L'existence de la crique au-dessus de l'arête tranchante protège en partie celle-ci, car elle ne subit que très peu de temps la pression du copeau. **Le rôle de l'arête tranchante consiste surtout à couper les aspérités** que laisse le copeau principal en se détachant.

e) La *rupture* du métal se produit sous l'action d'un effort de compression important : un **écrouissage du métal** en résulte ; il peut être constaté à la surface extérieure des pièces usinées.

# BROUTEMENT DES OUTILS

## 1° Broutement naturel.

Considérons, par exemple, une pièce de tour montée entre pointes et usinée au moyen d'un outil à charioter.

Nous avons vu que la pièce exerce sur l'outil des efforts qui ont pour effet de produire la flexion de celui-ci. La théorie de la formation du copeau, l'étude expérimentale des actions mutuelles pièce-outil, nous ont montré que ces efforts sont essentiellement variables. La flèche de l'outil, qui dépend de l'intensité des efforts, va donc varier et la distance de l'arête tranchante à l'axe de la pièce ne sera plus constante. La surface usinée présentera donc des ondulations qui caractérisent le broutement naturel de l'outil.

*Si la pièce est longue et mince,* les réactions de l'outil vont lui imprimer une flexion ondulée qui viendra encore amplifier les irrégularités de surface constatées précédemment. Pour éviter ce broutement, il faut donc diminuer le plus possible ces flexions.

a) **Limiter la flexion des outils** en choisissant un outil de section maximum et en diminuant le plus possible le porte-à-faux ;

b) **Limiter la flexion de la pièce** en prévoyant un support le plus près possible de l'outil : lunette à suivre pour les pièces de tour longues et flexibles, vérins disposés sous les pièces fraisées minces, etc. ;

c) **Limiter à la fois la flexion de la pièce et de l'outil** en diminuant l'intensité des efforts : diminution de la section du copeau.

## 2° Broutement mécanique.

Les vibrations résultant de la variation périodique des efforts mis en jeu par le travail de l'outil se trouvent amplifiées, si le support d'outil et le support de pièce sont eux-mêmes flexibles. D'autre part, s'il existe du jeu entre les paliers et la broche de la machine, il se produira un déplacement périodique de cette broche qui exagérera le phénomène de broutement.

En outre, les vibrations communiquées aux organes en mouvement et au bâti par la rotation des engrenages mal taillés, par le passage des agrafes des courroies sur les poulies, pourront aussi accroître le broutement.

Pour remédier à ces inconvénients, une machine-outil doit présenter les qualités suivantes :

a) **Le bâti doit être massif** pour absorber les vibrations. Il pourra être scellé au sol ou sur un socle en béton, notamment s'il s'agit de machines à rectifier ;

b) **Le support de pièce et le support d'outil doivent être rigides** et le jeu, existant entre les organes en mouvement et les supports, doit être réglé à une valeur minimum ;

c) **Les organes en mouvement doivent être parfaitement équilibrés** (équilibre statique et dynamique) ;

d) **Les courroies utilisées seront des courroies sans fin** (courroies coton ou caoutchouc) ;

e) **Les engrenages de la boîte de vitesse doivent être rectifiés avec soin.**

Lorsque du broutement est constaté sur une machine, un changement de vitesse peut amener une diminution appréciable du phénomène, les conditions d'interférence des différentes vibrations pouvant être modifiées.

# ÉTUDE DE LA TRAJECTOIRE ÉLASTIQUE DES OUTILS

Sous l'action des efforts de coupe, il se produit des *déformations élastiques* de l'outil de la pièce, des supports de l'outil et de la pièce. Ces déformations ont pour effet de modifier la position de l'arête tranchante par rapport à la surface usinée. L'extrémité de l'outil, sous l'action des efforts de coupe variables, va donc se déplacer constamment. Lorsqu'elle tend à s'écarter de la pièce quand l'effort de coupe augmente, on dit que l'*outil se dégage.*

Au contraire, une augmentation de l'effort peut provoquer la pénétration de l'outil dans le métal : *l'outil s'engage.* Dans ce cas, les efforts de coupe tendent à augmenter encore et une usure rapide du tranchant se produit.

Considérons un outil d'étau-limeur (*fig.* 12). Sous l'action de l'effort $F_1$, il va fléchir et le déplacement de l'arête tranchante peut être considéré comme une rotation de centre O. La trajectoire élastique est un arc de circonférence C. Comme cette trajectoire est située en partie à l'intérieur de la pièce, l'outil s'engage. Si le support d'outil est flexible, le centre de rotation va reculer en O′ et la trajectoire sera plus engageante.

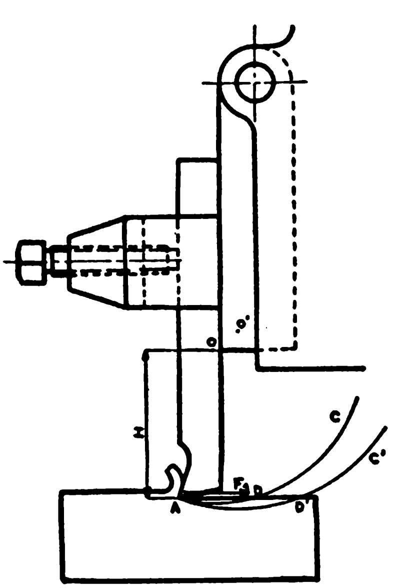


*Fig.* 12. — **Outil dont la trajectoire est engageante.**

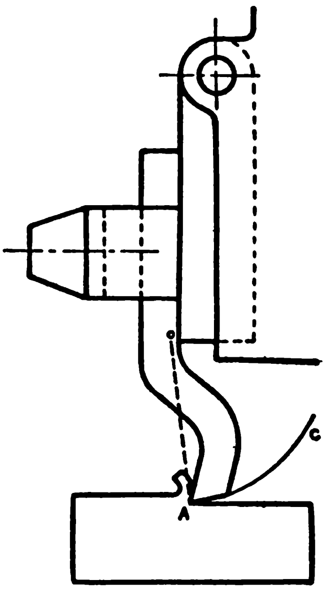
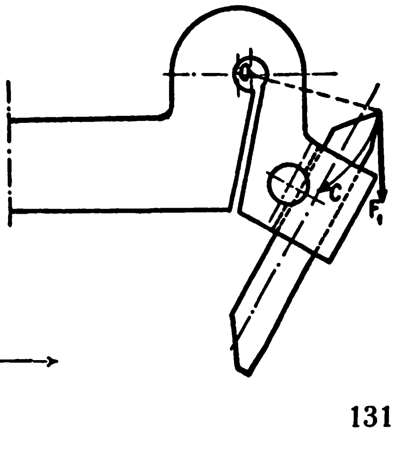


*Fig.* 13. — **Outil coudé dont la trajectoire est dégageante**

Prévoyons, au contraire, un outil coudé (*fig.* 13). Il est facile de constater qu'avec un support rigide, l'outil se dégage sous l'action de l'effort de coupe. Le travail est mieux fait et l'usure minimum.

Pour éviter l'engagement de l'outil, on utilise des porte-outils flexibles. Le centre de rotation O se trouve ainsi déporté nettement en arrière de l'arête tranchante (*fig.* 14).

*Fig.* 14. — **Porte-outil flexible.** ——→



Pour limiter l'engagement de l'outil, il faut réduire au maximum les déformations élastiques : outil de forte section, faible porte-à-faux, support d'outil rigide. En outre, il est souvent nécessaire de rechercher les moyens qui permettront d'éviter la flexion de la pièce en cours d'usinage (lunettes à suivre, brides diverses).

Dans le cas du tournage, l'inversion du sens de rotation assure bien souvent le dégagement de l'outil lorsque le tour utilisé est ancien.

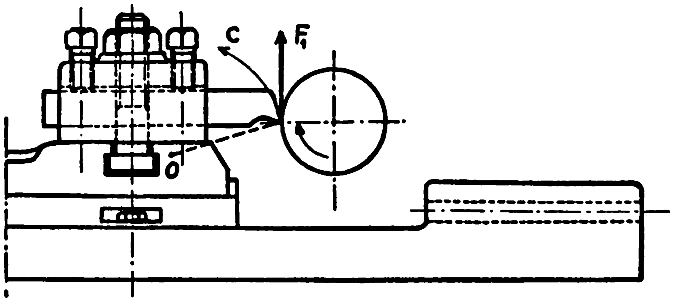



*Fig.* 15. — Tournage à l'envers permettant d'obtenir une trajectoire dégageante.

L'action $F_1$ est alors dirigée de bas en haut. Les chariots porte-outils se trouvent avoir dans ce sens une plus grande flexibilité et, le centre de rotation O se trouvant abaissé, la trajectoire peut être dégageante (*fig.* 15).

La rigidité des chariots et supports d'outils rend cette pratique inutile sur les tours modernes.

◇

# L'arrosage

## CHALEUR PRODUITE PAR LA COUPE DU MÉTAL

L'expérience a montré que l'usinage du métal est accompagné d'un dégagement de chaleur souvent très important.

La chaleur produite a pour cause :

1° **Le travail de rupture du métal** qui résulte de l'action de l'outil contre les forces d'attraction moléculaire et de la résistance du copeau à l'enroulement. Plus le métal est tenace, plus sont importantes la section du copeau et surtout son épaisseur ; plus la pente d'affûtage de l'outil est faible et la vitesse de coupe élevée, plus grande est la quantité de chaleur produite par unité de temps.

2° **Le frottement continu du copeau sur la face de coupe de l'outil**

La quantité de chaleur produite par ce frottement est proportionnelle :

- au temps de travail $t$ ;
- à la vitesse de coupe $v$ ;
- à la pression du copeau sur l'outil, elle-même proportionnelle à la résistance à la rupture du métal travaillé et à la section du copeau ;
- au coefficient de frottement $f$ du copeau sur la face de coupe de l'outil (coefficient d'autant plus grand que copeau et face de coupe sont plus rugueux).

## CONSÉQUENCES RÉSULTANT DE CE DÉGAGEMENT DE CHALEUR

La chaleur produite par le travail de l'outil a pour effet :

1° **D'augmenter la température de l'extrémité trempée de l'outil.**

Celle-ci peut alors perdre de sa dureté.

Il en résulte une usure rapide de la face de coupe et de l'arête tranchante.

Le frottement du copeau augmente, la température de l'outil aussi et la coupe du métal devient impossible.

**2° D'augmenter la température de la pièce.** Une dilatation du métal se produit. Elle entraîne des erreurs par défaut dans la mesure des cotes, car les instruments de mesure (calibre, palmer, pied à coulisse) ont une température plus faible que celle de la pièce.

D'autre part, les conditions de montage de la pièce peuvent se trouver dangereusement modifiées. Au tour, par exemple, la dilatation du métal augmente la pression de la pièce sur la contre-pointe et entraîne la détérioration de celle-ci ; une pièce, bridée sur la table d'une fraiseuse, peut se déformer en s'échauffant et, au refroidissement, l'usinage se révèle incorrect ; l'échauffement superficiel des pièces rectifiées peut avoir pour conséquence la production de criques et leur détrempe partielle.

## NÉCESSITÉ DE S'OPPOSER A L'AUGMENTATION DE TEMPÉRATURE DE L'OUTIL ET DE LA PIÈCE

Pour limiter l'augmentation de température de l'outil et de la pièce, on peut :

*a*) évacuer la chaleur au fur et à mesure qu'elle se produit ;

*b*) chercher à diminuer la quantité de chaleur dégagée au cours de l'usinage.

### 1° Évacuation de la chaleur.

Elle se fait naturellement par conductibilité à travers la pièce et le corps de l'outil.

L'outil doit donc avoir une section aussi grande que possible, surtout aux environs de la partie active qui se trouve précisément dans la zone de production de chaleur. C'est ainsi que, pour les outils à charioter, on préfère la forme représentée par la *figure* 2 à celle de la *figure* 1.

Sur les grandes fraises, les dents se refroidissent mieux car, après la période de travail, elles parcourent dans l'air un plus long trajet avant de revenir en contact avec le métal.

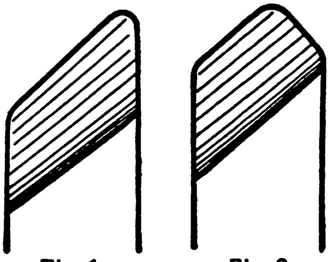


*Fig.* 1. *Fig.* 2.
Outils à charioter meulés.

L'évacuation des calories par conductibilité est généralement insuffisante ; elle peut être accélérée par un jet de fluide dirigé à la fois sur la pièce, le copeau et l'outil (air sous pression ou liquide).

### 2° Diminution de la chaleur produite.

Nous avons vu que la chaleur résultant de la coupe du métal est fonction :

— de la ténacité du métal travaillé ;

— de la vitesse de coupe ;
— de la section du copeau et de son épaisseur;
— de la forme de l'outil ;
— de l'état de surface du copeau et de la face de coupe de l'outil.

Pour des conditions de travail déterminées : nature du métal, vitesse de coupe, section du copeau, on peut diminuer la chaleur produite en recherchant un dégagement du copeau aussi facile que possible. L'avance par tour, par coup ou par dent, est rendue faible au maximum : le copeau d'épaisseur minimum peut ainsi facilement s'enrouler.

On doit également rechercher la pente d'affûtage maximum qui facilite le glissement du copeau sans toutefois compromettre la résistance de l'outil.

Pour diminuer le frottement du copeau sur l'outil, on s'efforce d'obtenir une face d'attaque polie, en utilisant, pour l'affûtage, une meule à grains fins, et même une pierre à huile. On recherche une surface de copeau aussi lisse que possible, en évitant l'arrachement du métal (outil bien placé, angles respectés).

Si, en outre, on interpose entre le copeau et la face de coupe de l'outil un lubrifiant (huile ou graisse), le frottement se trouve largement diminué.

## LES FLUIDES UTILISÉS

Pour éviter l'échauffement de l'outil et de la pièce, on utilise :

a) **Des fluides réfrigérants** qui n'ont d'autre objet que d'évacuer les calories produites : l'eau et l'air soufflé.

b) **Des lubrifiants** dont le rôle est de diminuer la chaleur dégagée : le suif et les huiles de coupe.

c) **Des liquides à la fois réfrigérants et lubrifiants** : mélange d'eau (réfrigérant) et d'huile soluble (lubrifiant).

La qualité primordiale de ces différents fluides est leur **pouvoir mouillant** qui leur permet d'atteindre rapidement la pointe de l'outil afin de refroidir ou lubrifier cette partie vitale.

### A. — Fluides réfrigérants

a) **L'air soufflé**, utilisé sur certaines meules.

b) **L'eau**, employée sur quelques meules d'affûtage, l'est rarement sur les machines-outils, car elle oxyde les pièces et les machines. Pour diminuer cette oxydation, on ajoute à l'eau 2 à 3 % de soude, mais alors les projections de liquide sont dangereuses et la peinture des machines se trouve attaquée.

## B. — Lubrifiants

**Ils comprennent :**

a) **Le suif**, utilisé en petite quantité sur la pointe des outils;

b) **Les huiles de coupe.**
Elles doivent posséder à la fois un pouvoir mouillant élevé et un pouvoir lubrifiant qui assure, malgré une pression importante, l'existence d'une pellicule d'huile entre copeau et outil.
Cette dernière propriété constitue la **filmo-résistance** de l'huile.

Les **huiles végétales** (colza) ou **animales** (huile de lard) feraient d'excellentes huiles de coupe si elles ne rancissaient pas à l'usage.

Les **huiles minérales**, plus stables, ne s'oxydant pas à l'air, sont seules employées, bien qu'elles donnent des résultats inférieurs à ceux obtenus avec les huiles neuves végétales ou animales.
Le pouvoir mouillant et lubrifiant des huiles minérales est nettement amélioré par l'incorporation d'une petite quantité de soufre (1 à 3 %) ou de graphite.

c) **Conditions d'emploi.**

Les huiles de coupe peuvent être employées :

1° *En petite quantité*, au moyen d'une burette pour les travaux de perçage, de taraudage ou d'alésage à main.

2° *En grande quantité*, par jet.

**Les huiles de coupe sont recommandées :**

1° Pour des travaux délicats exécutés à vitesse de coupe moyenne, sans échauffement excessif, au moyen d'outils de forme ou dont le réglage est difficile (décolletage sur tours automatiques, machines à brocher, machines à fileter, etc.).

2° Sur les machines où le liquide d'arrosage risque de se mélanger avec les huiles de graissage (machines à tailler).

3° Sur les machines de précision où l'on craint de détériorer les glissières (machines à pointer).

## C. — Réfrigérants et lubrifiants simultanés

Le liquide d'arrosage, généralement de couleur blanche, est constitué par un mélange d'eau (réfrigérant) avec 5 ou 10 % d'huile soluble (lubrifiant).

L'huile soluble est un mélange d'huiles minérales, d'un agent d'émulsion qui assure le mélange stable de l'huile avec l'eau, et d'un désinfectant (phénol) dont le rôle est de protéger les ouvriers contre les boutons d'huile.

**a) Propriétés d'un liquide d'arrosage.**

Un liquide d'arrosage doit :

- — Présenter un pouvoir mouillant élevé afin que la réfrigération et la lubrification intéressent toute la partie active de l'outil ;
- — Avoir un pouvoir lubrifiant important.

Par contre, il ne doit pas :

- — Gommer les glissières et les tuyauteries ;
- — Oxyder les organes des machines ;
- — Rancir ni se décomposer rapidement ;
- — Encrasser les meules ;
- — Dissoudre partiellement le caoutchouc ;
- — Être infectant.

**b) Conditions d'emploi des huiles solubles.**

On utilisera les émulsions d'huile soluble pour les travaux effectués à grande vitesse lorsque la pression du copeau sur l'outil n'cst pas trop forte : tournage, sciage, fraisage.

## INFLUENCE DE L'ARROSAGE SUR LA VITESSE DE COUPE

L'arrosage des outils de coupe a permis d'adopter des vitesses de coupe supérieures à celles qui sont admises dans le travail à sec.

Si $V_l$ désigne la vitesse de coupe pour travail lubrifié sous pression et $V_s$ la vitesse de coupe pour travail à sec, on prend généralement :

*Perçage* : $V_l = \frac{5}{4}$ à $\frac{3}{2} V_s$

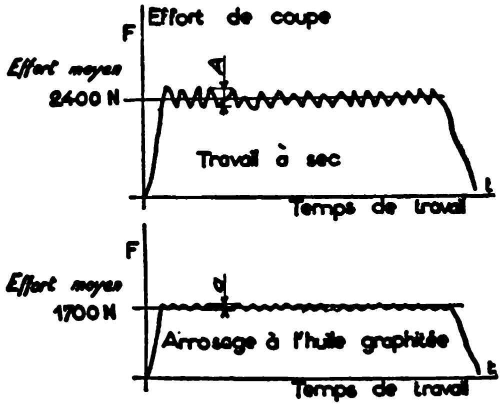
*Chariotage au tour* : $V_l = \frac{3}{2} V_s$

*Rabotage* : $V_l = \frac{3}{2} V_s$

*Fraisage* : $V_l = 2\ V_s$

## INFLUENCE DE L'ARROSAGE SUR LA PRESSION DE COUPE

Les essais ont montré que l'arrosage provoque une sensible diminution de la pression de coupe, car le copeau, qui glisse mieux sur la face de coupe de l'outil, se dégage plus facilement. Par exemple, pour le chariotage de l'acier doux, la




pression de coupe passe de 2 400 N/mm² à 1 700 N/mm² si le travail se fait avec lubrification à l'huile graphitée. En outre, les variations périodiques de la pression de coupe résultant de la rupture du copeau se trouvent également diminuées : A > *a*. C'est ce que montre la *figure* 3 qui représente l'enregistrement, dans les deux cas, de l'effort de coupe en fonction du temps de travail.

Chariotage d'acier doux $(R_r)_e = 450$ N/mm².

← *Fig.* 3. — Variations de l'effort de coupe en fonction de l'arrosage.

# INFLUENCE DE L'ARROSAGE SUR L'ÉTAT DE SURFACE

Les lubrifiants d'arrosage améliorent sensiblement l'état des surfaces usinées :

1° En facilitant l'écoulement du copeau, ce qui diminue en même temps les risques de broutement ;

2° En permettant l'augmentation de la vitesse de coupe qui a pour conséquence directe d'éviter tout arrachement de métal.

L'expérience a montré que les huiles solubles donnent un meilleur état de surface que les huiles de coupe pour le travail des aciers doux ; pour le travail des aciers plus tenaces on constate le résultat inverse. La *figure* 4 représente deux coupes de pièces vues au microscope, usinées, l'une à sec, l'autre avec lubrification abondante à l'huile graphitée.

Chariotage à sec — Chariotage lubrifié

*Fig.* 4. — État des surfaces.

Remarques.

1° Il serait intéressant d'obtenir un copeau aussi chaud que possible pour profiter de la diminution de résistance à la rupture du métal et de refroidir seulement l'outil qui garderait ainsi sa dureté maximum.

Pratiquement, il est très difficile de réaliser simultanément ces deux conditions. Lorsqu'on dispose d'acier rapide dont la dureté peut être conservée jusqu'à 600°, l'arrosage doit être réglé pour que le copeau ait une température de 300 à 400°. Lorsque la vitesse de coupe n'est pas très élevée, un arrosage

trop important risque d'amener une usure un peu plus rapide de l'outil, car le métal coupé présente alors, du fait de sa basse température, le maximum de résistance. Ce phénomène sera mis en évidence au cours de l'étude des vitesses de moindre usure des outils.

2° Dans le cas où le métal coupé s'effrite, il faut éviter que les particules ainsi produites ne forment, avec le liquide, une boue abrasive. Ainsi, dans le travail de la fonte, l'arrosage ne donne de bons résultats que si le jet est assez violent pour entraîner les particules de métal au fur et à mesure de leur formation.

# INSTALLATIONS D'ARROSAGE

Pour économiser les huiles de coupe, le liquide d'arrosage est récupéré après usage, débarrassé par décantation des copeaux et limailles, puis envoyé à nouveau sur l'outil en action, par l'intermédiaire d'une pompe à engrenages ou centrifuge.

Le jet de liquide doit être dirigé de façon à arroser à la fois le copeau et la pièce (voir *fig.* 5). On a constaté un avantage certain avec un liquide projeté à faible vitesse et s'écoulant par un gros ajutage.

Le débit du jet en litres par minute doit être au moins égal à :

$Q = k \cdot v \cdot s$, avec $k = 0{,}15$.

*v*, vitesse de coupe en millimètres par minute ;

*s*, section du copeau en millimètres carrés.

Les installations d'arrosage peuvent être :

— *individuelles*, c'est-à-dire adaptées à chaque machine-outil ;

— *générales* pour tout un atelier, avec distribution du liquide à chaque machine par tuyauterie.

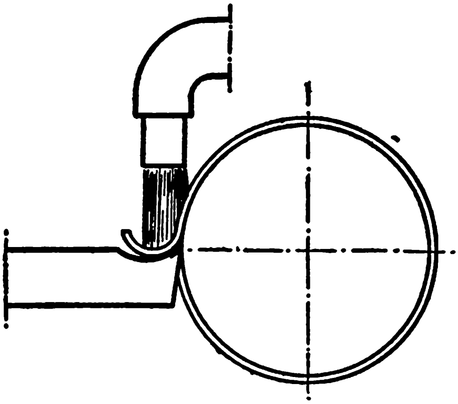


*Fig.* 5. — Disposition du jet de liquide lubrifiant.

## A. — Installations individuelles

Elles tendent à se généraliser car chaque machine-outil moderne est étudiée avec son système d'arrosage.

La *figure* 6 donne le détail d'une installation sur tour parallèle. Un bac en tôle est prévu pour recevoir le liquide qui vient d'être utilisé. Une cuve de décantation effectue une première séparation des copeaux. Le liquide est ensuite dirigé par une tuyauterie dans un deuxième décanteur qui communique avec le réservoir où une pompe l'aspire et le refoule vers l'ajutage d'utilisation. Un tuyau de caoutchouc et des tuyauteries métalliques comportant des raccords articulés dirigent à tout instant le jet au droit de l'extrémité de l'outil. Un robinet permet d'interrompre et de régler le débit du liquide d'arrosage.

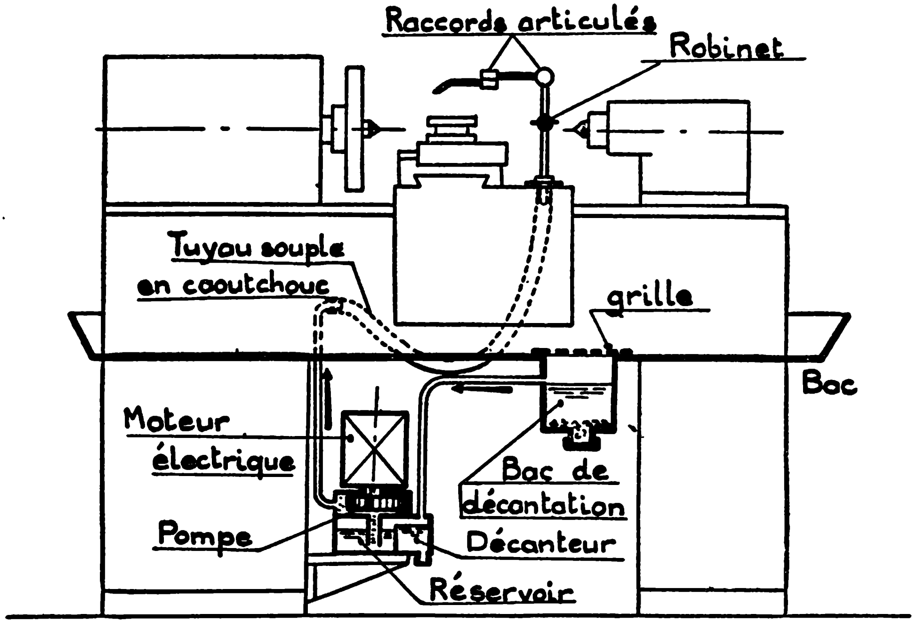



*Fig. 6.* — **Installation individuelle d'arrosage sur tour parallèle.**

La pompe peut être commandée mécaniquement ou directement par moteur électrique individuel.

Les éléments fondamentaux de cette installation se retrouvent dans les installations d'arrosage de toutes les machines-outils : bac de récupération du liquide, décanteur, pompe et tuyauteries articulées.

## B. — Installations générales d'atelier

Elles sont de deux types, suivant qu'elles possèdent un réservoir en charge ou un réservoir sous pression.

**a) Installation avec réservoir en charge** (*fig.* 7).

**Dans cette installation, le réservoir est installé à un niveau supérieur à celui des machines. Dans la cave sont placées une cuve de décantation et la pompe de refoulement à commande électrique. Chaque machine possède un bac de réception du liquide utilisé où s'effectue une première décantation. Les tuyauteries de retour sont placées en caniveau ; celles qui distribuent le liquide sont disposées indifféremment en l'air ou en caniveau. Parfois le caniveau lui-même peut servir au retour du liquide dans la cuve de décantation. On remarquera, sur la tuyauterie de refoulement du liquide, un clapet de retenue qui empêche le réservoir de se vider quand la pompe est arrêtée. Le liquide dans le réservoir oscille entre deux niveaux grâce à un contacteur à flotteur qui met automatiquement la pompe en action et l'arrête au moment voulu.**

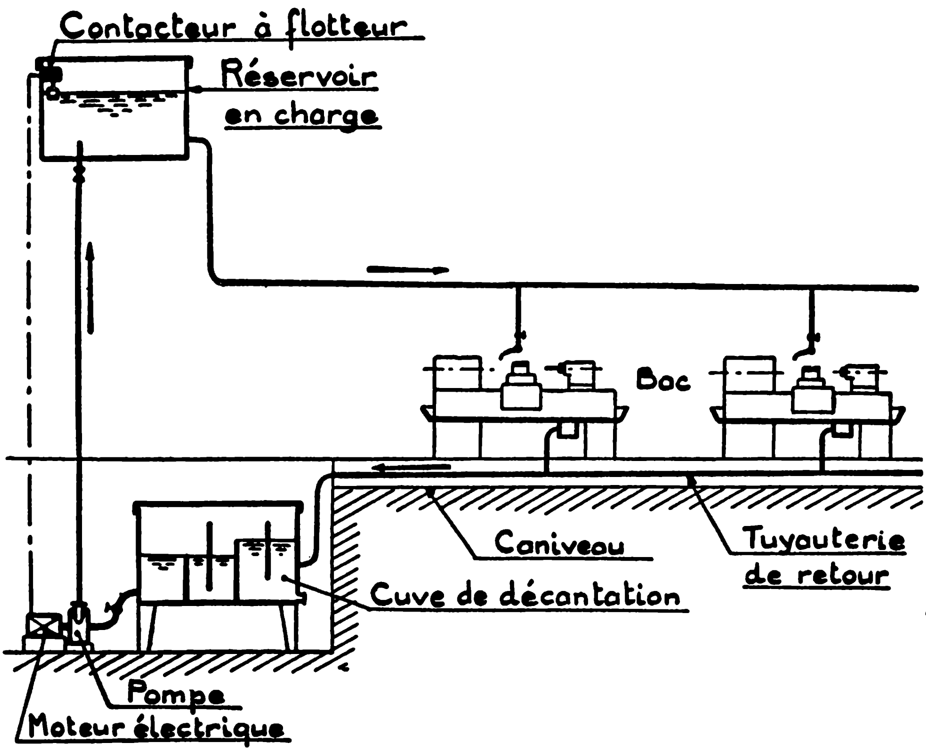



***Fig.* 7. — Installation d'arrosage d'atelier de mécanique avec réservoir en charge.**

**b) Installation avec réservoir sous pression** (*fig.* 8).

Cette installation ne diffère de la précédente que par la position du réservoir disposé dans la cave à un niveau inférieur à celui des machines. La pompe introduit le liquide dans le réservoir étanche ; la pression de l'air restant à la partie supérieure assure le refoulement du liquide dans les tuyauteries des différentes machines.

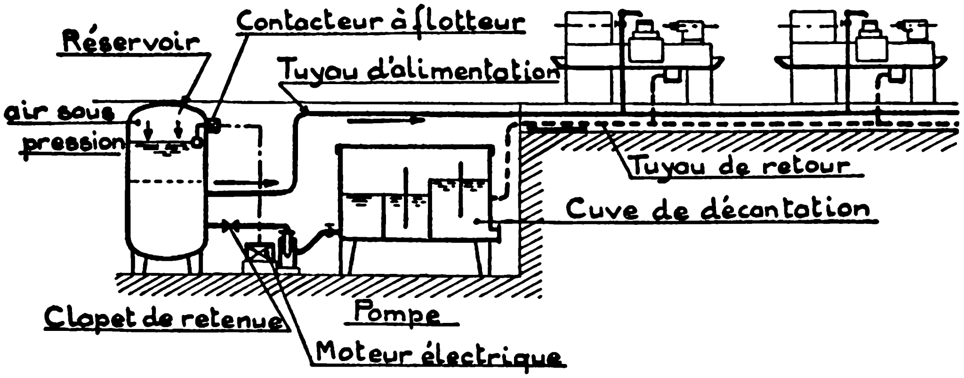



***Fig.* 8. — Installation d'arrosage d'atelier avec réservoir sous pression.**

Le fonctionnement automatique de la pompe est assuré par un contacteur à flotteur.

La pression du liquide est d'environ 1 ou 2 $kgf/cm^2$, soit 10 à 20 $N/cm^2$.

◇

# Alliages utilisés pour la fabrication des outils de coupe

Il est bien évident que la dureté de la partie active des outils doit être supérieure à celle des métaux travaillés.

Cette dureté doit se conserver à une température élevée pour que l'outil ne perde pas une partie de ses qualités lorsqu'on le soumettra à un travail de coupe intense, à grande vitesse.

Les alliages utilisés comprennent :

## LES ACIERS AU CARBONE DURS ET EXTRA-DURS

Trempés et revenus vers 250 ou 350°, ils servent à la fabrication d'outils travaillant à une faible vitesse de coupe : outils à main, tarauds, alésoirs, etc.

Ces outils ne peuvent avoir un grand rendement, car leur dureté diminue considérablement vers 400°.

## LES ACIERS A COUPE RAPIDE

Les aciers à coupe rapide ou *aciers rapides* sont des aciers spéciaux comprenant du fer, du carbone, du tungstène, du chrome, et parfois du vanadium, du molybdène et même du cobalt.

On distingue trois qualités d'aciers à coupe rapide :

1° Les aciers rapides ordinaires : A. R. O., qui contiennent du fer et environ 0,7 % de carbone, 4 % de chrome et 15 % de tungstène.

2° Les aciers rapides supérieurs : A. R. S., qui contiennent du fer et environ 0,8 % de carbone, 5 % de chrome, 18 % de tungstène, 2 % de vanadium, 2 % de molybdène.

3° Les aciers rapides extra-supérieurs : A. R. E. S., qui contiennent du fer et environ 0,8 % de carbone, 5 % de chrome, 20 % de tungstène, 2 % de vanadium, 2 % de molybdène et 10 % de cobalt.

Ces aciers ont la propriété de conserver à haute température la dureté qui leur a été conférée par la trempe.

Les aciers rapides conservent une dureté acceptable pour un outil jusqu'aux températures suivantes :

*acier rapide ordinaire* : 475°,
*acier rapide supérieur* : 550°,
*acier rapide extra-supérieur* : 650°.

Les aciers rapides sont utilisés sous la forme d'outils monoblocs ou de pastilles brasées à l'extrémité de barreaux en acier demi-dur.

## LES CARBURES MÉTALLIQUES

Ils sont constitués par des carbures de tungstène, de titane, de tantale, de bore agglomérés dans du cobalt.

Les carbures sont utilisés sans traitement thermique préalable, sous forme de pastilles brasées à l'extrémité de barreaux en acier demi-dur. Leur dureté est de beaucoup supérieure à celle des meilleurs aciers rapides et elle ne subit pas de diminution sensible jusqu'à une température de 1 000°.

On a pu les utiliser pour l'usinage de métaux inattaquables par les aciers rapides : aciers au manganèse, aciers traités, fontes blanches, etc. Les vitesses de coupe permises avec des outils en carbure sont de 5 à 10 fois plus fortes que les vitesses tolérées par les outils en aciers rapides ordinaires.

### Principales variétés de carbures

#### 1° Carbures pour usinage de l'acier.

a) **Carbures pour travaux de finition** employés avec une vitesse de coupe élevée pour produire un copeau continu ; ils sont très durs mais très fragiles.

b) **Carbures pour travaux d'ébauche et de finition** ; moins fragiles que les précédents, ils ne peuvent cependant pas subir de chocs.

c) **Carbures pour travaux d'ébauche pouvant supporter des chocs** ; ils peuvent travailler lorsque la coupe est discontinue, notamment sur les étaux-limeurs.

#### 2° Carbures pour usinage de la fonte.

a) **Carbures pour usinage de fonte douce, de bronze, de laitons.**

b) **Carbures pour usinage de fonte dure, de verre, de porcelaine.**

# LES CÉRAMIQUES

C'est vers 1954 que l'on a songé à utiliser les céramiques pour exécuter la partie active des outils. Les céramiques employées à cet effet sont composées d'oxyde d'aluminium ($Al_2O_3$) et d'oxyde de chrome ($Cr_2O_3$). Les pastilles de céramique sont obtenues par moulage et cuisson, les constituants mélangés étant fortement comprimés pendant la cuisson.

Les pastilles sont fixées par pression à l'extrémité d'un porte-outil en acier.

La dureté des céramiques est comparable à celle des meilleurs carbures.

Les céramiques conservent une dureté suffisante pour la coupe des métaux jusqu'à 1 200°.

Aussi a-t-on pu, avec ces outils, tailler les métaux à des vitesses de coupe 2 à 3 fois supérieures à celles des carbures.

Étant donnée la fragilité encore trop grande des céramiques, leur emploi, à l'heure actuelle, ne s'est pas généralisé. Les outils pastillés de céramique sont surtout utilisés pour le tournage des fontes dures et des aciers spéciaux traités.

Voici quelques exemples d'application :

— *Tournage de fonte dure* (dureté Rockwell C : 220).
  $a = 0{,}8$ ; $p = 5$ — vitesse de coupe : 400 m/mn,
  $a = 0{,}1$ ; $p = 1$ — vitesse de coupe : 1 000 m/mn.

— *Tournage d'acier au nickel-chrome recuit* $(Rr)_e = 800$ N/mm².
  $a = 0{,}3$ ; $p = 7$ — vitesse de coupe : 400 m/mn.

— *Tournage de ce même acier traité* $(Rr)_e = 1\,500$ N/mm².
  $a = 0{,}2$ ; $p = 2$ — vitesse de coupe : 100 m/mn.

Avec les outils en céramique, on obtient de très beaux états de surface : ceci semble résulter de la grande dureté et de l'impossibilité de formation du copeau adhérent.

# LE DIAMANT

Le diamant est utilisé sous forme de grains sertis sur des barreaux d'acier, pour les travaux de superfinition à très grande vitesse.

# Le copeau gratté

## GRATTAGE A L'OUTIL

Pour enlever, sur une pièce, un copeau très fin d'une épaisseur de l'ordre de 0,01 mm, on utilise un outil dont le mode d'action est différent de celui de l'outil qui produit un copeau taillé.

Cet outil porte le nom de *grattoir* ; il travaille avec un angle de dépouille de 20° environ, un angle de taillant de 85 ou 90° et un angle de coupe négatif de 20 à 30° environ.

Il ne coupe convenablement que si son arête tranchante a une très grande finesse (affûtage sur la pierre à huile).

Un léger effort vertical est nécessaire pour produire un copeau qui peut être extrêmement fin et atteindre même quelques microns $\left(\frac{2 \text{ à } 3}{1000} \text{ mm}\right)$.

Lorsque l'arête tranchante perd de son acuité, l'opérateur se voit contraint d'augmenter l'effort exercé ou de donner une plus grande inclinaison à l'outil (augmentation de *a*).

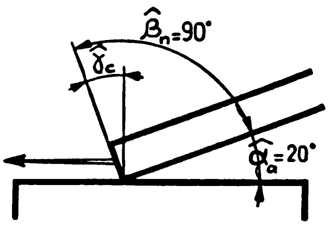



*Fig.* 1. — Grattoir pour travail en poussant.

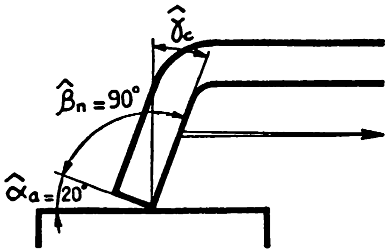



*Fig.* 2. — Grattoir pour travail en tirant.

Il existe des grattoirs que l'on déplace en poussant (voir *fig.* 1) et d'autres que l'on déplace en tirant (voir *fig.* 2).

Le grattage des surfaces planes s'effectue par petites surfaces, suivant deux directions perpendiculaires.

Long et coûteux, le grattage ne peut avoir lieu que sur des surfaces déjà bien préparées à l'outil. Il constitue une opération de finition dans le dressage des glissières en fonte des machines, ou dans l'usinage des coussinets des paliers. Ainsi, le contact des pièces peut être réalisé en de nombreux points (jusqu'à 12 par $cm^2$).

Le copeau gratté se retrouve dans le meulage, le rodage, et sous une forme plus grossière, dans le limage.

# L'OUTIL MEULE

## A. — Généralités

Les matériaux abrasifs sont constitués par des grains ou des cristaux durs, dont les arêtes vives sont susceptibles de couper le métal. Exemple : grès, émeri, carbure de silicium.

Les premières meules qui ont été utilisées pour le travail des métaux étaient en *pierre naturelle,* généralement en grès. Elles sont encore employées pour l'affûtage de certains outils : outils de menuiserie, instruments agricoles, etc. Elles présentent l'inconvénient de manquer d'homogénéité et, de ce fait, elles ne peuvent conserver à l'usage une forme géométrique. Aussi ont-elles été remplacées par des *meules artificielles* qui ont permis le travail de tous les métaux par enlèvement du métal sous forme de petits copeaux.

Leur emploi se généralise de plus en plus et la meule est devenue :

*a*) un outil d'affûtage ;
*b*) un outil de finition (rectification) ;
*c*) un outil de production (usinage par meulage).

## B. — Mode d'action des meules artificielles

Une meule peut être considérée comme un outil à tranchants multiples.

Les outils élémentaires sont constitués par des grains de matière dure à arêtes vives : l'*abrasif.*

Le support d'outil qui relie et supporte les différents grains d'abrasif est appelé *agglomérant.*

Chaque grain, orienté d'une façon quelconque sur la surface de la meule, travaille à la façon d'un grattoir. Il enlève un copeau généralement court, car il ne présente qu'un petit contact avec la surface à usiner. Le grain s'use à chaque tour de meule, son tranchant devient moins vif ; il frotte davantage et s'échauffe. Suivant la résistance de l'agglomérant, influencée par la température du grain, il finit par se détacher et est entraîné en raison de sa vitesse. Il est alors remplacé par un nouveau grain à arêtes vives et ainsi de suite.

## C. — Caractéristiques des meules

Pour définir une meule, il faut donc préciser la nature, la position relative de ses constituants, sa forme ainsi que ses dimensions, c'est-à-dire les caractéristiques de constitution, de forme et de dimensions.

## 1° Caractéristiques de constitution.

Elles sont représentées par des symboles, lettres ou chiffres ; elles définissent :

- — la nature de l'abrasif ;
- — la grosseur de ses grains ;
- — le grade, qui est l'indice de la force avec laquelle l'agglomérant retient les grains d'abrasif ;
- — la structure, qui est l'indice de tassement des grains ;
- — la nature de l'agglomérant.

### a) *Abrasifs.*

Les abrasifs sont des corps extrêmement durs, se présentant sous forme de grains à arêtes très vives, employés pour la fabrication des meules.

Ils comprennent :

— **Les abrasifs naturels :**

Le *diamant* finement divisé, utilisé pour la fabrication des meules servant à affûter les outils en carbure.

L'*émeri* et le *corindon* (grains d'alumine pure).

— **Les abrasifs artificiels**, qui comprennent deux grandes classes :

Les *abrasifs alumineux*, obtenus par la fusion au four électrique de la bauxite (mélange d'oxydes d'aluminium, de silicium et de fer).

Ils portent les noms d'*aloxite*, *alundum*, etc.

Les *abrasifs siliceux*, essentiellement constitués par du carbure de silicium, fabriqués au four électrique et appelés : *crystolon*, *carborundum*, *carbolite*, etc.

**Choix de l'abrasif :**

Les *abrasifs alumineux* sont utilisés pour le travail des métaux ayant une contrainte de limite élastique élevée : aciers, bronze phosphoreux.

Les *abrasifs siliceux* sont recommandés pour les métaux ayant une faible contrainte de limite élastique : fonte, laitons, cuivre, aluminium et ses alliages, magnésium et ses alliages et les matières non métalliques.

**Tableau des abrasifs Norton :**

| | | |
|---|---|---|
| Alundum régulier ............ | Symbole | néant |
| Alundum 38 ................. | — | 38 |
| Alundum 19 ................. | — | 19 |
| Crystolon .................. | — | 37 |

### b) *Grosseur du grain.*

La grosseur moyenne des grains d'abrasif s'exprime par un nombre égal à la quantité de mailles par pouce linéaire (25,4 mm) du tamis utilisé pour la séparation des grains.

Les numéros de grain varient de 8 à 200. Comme première approximation, on admet qu'en divisant par 25 le numéro de grosseur on obtient la dimension moyenne en millimètres du grain d'abrasif.

Le *tableau ci-dessous* indique la correspondance entre les numéros de grosseur, les dimensions du grain et le symbole utilisé pour la désignation des émeris et des poudres :

TABLEAU DES GROSSEURS DE GRAINS

| QUALITÉ | NUMÉRO DE GROSSEUR | DIMENSION DU GRAIN EN MM | N° DE L'ÉMERI | POUDRE |
|---|---|---|---|---|
| Gros | 8 | 4,09 | 12 | |
| | 12 | 2,62 | 9 | |
| | 16 | 1,80 | 7 | |
| | 24 | 1,03 | 5 | |
| Moyen | 30 | 0,66 | 4 | |
| | 46 | 0,46 | 3 | |
| | 60 | 0,41 | 1 | |
| | 80 | 0,27 | 0 | |
| Fin | 100 | 0,16 | 00 | |
| | 120 | 0,15 | 000 | |
| | 150 | 0,12 | 000 | |
| | 180 | 0,09 | 0000 | |
| Très fin | 220 | 0,07 | 00000 | |
| | 240 | 0,06 | 1 minute | |
| | 280 | 0,054 | 4 — | F |
| | 320 | 0,04 | 6 — | 2 F |
| Poudres | 400 | 0,03 | 10 — | 3 F |
| | 500 | 0,012 | 60 — | 4 F |
| | 600 | 0,007 | | |

La classification des poudres se fait d'après la durée de décantation dans l'eau.

**Choix de la grosseur du grain :**

Par rapport à l'agglomérant, chaque grain abrasif de la surface extérieure d'une meule se trouve en relief de la moitié de sa dimension. Chaque grain, se comportant comme un outil, détache un copeau qui vient se loger dans l'intervalle existant entre deux grains consécutifs tant qu'il y a contact entre la meule et la pièce.

Une meule, dont les grains abrasifs sont gros, peut donc pénétrer profondément dans le métal et faire de fortes passes si toutefois l'espace entre les grains est suffisant pour assurer le logement des copeaux. Lorsque la surface de contact de la pièce et de la meule est grande, le volume des copeaux qui doivent se loger entre les grains augmente ; aussi, pour éviter que la meule ne « bourre », doit-on, dans ce cas, choisir un grain d'abrasif le plus gros possible. D'autre part, l'effort s'exerçant sur chaque grain d'abrasif est fonction de la dureté du métal travaillé.

La profondeur de passe, et par suite la grosseur du grain, sera d'autant plus faible que le métal travaillé sera dur.

Il est enfin à noter que plus le grain est gros, plus sont importants les sillons laissés par la meule dans le métal.

Ces considérations permettent d'établir les conclusions suivantes :

1° Pour *le dégrossissage*, où l'on recherche le maximum de rendement de la meule, on choisira *un gros grain* ;

2° Pour *la finition*, où l'on désire obtenir un beau fini, on choisira une meule à *grains fins* ;

3° Pour le travail des *métaux durs*, il faut choisir un *grain plus petit* que pour le travail des métaux tendres ;

4° *La grosseur du grain doit augmenter si la surface de contact de la meule et de la pièce augmente.*

## c) *Grade.*

Le grade caractérise la force avec laquelle l'agglomérant retient les grains. Une meule est dite *tendre* si les grains d'abrasif se détachent facilement, et *dure* dans le cas contraire.

La dureté d'une meule se caractérise par une lettre prise dans l'ordre alphabétique.

L'échelle de dureté de la compagnie *Carborundum* comprend les différentes lettres de l'alphabet, de D (meules très dures) à Z (meules très tendres).

L'échelle NORTON va en sens inverse, de E (meules très tendres) à Z (meules très dures).

Dans les deux échelles, M indique une dureté moyenne.

**Choix du grade :**

Nous avons vu que chaque grain d'abrasif se comporte, si ses arêtes sont vives, comme un outil qui coupe bien le métal. Lorsque les arêtes sont émoussées, le grain ne coupe plus, la meule se lustre et frotte sur la pièce ; il se produit alors un dégagement de chaleur important qui risque de provoquer des criques superficielles sur la pièce. De toute évidence, il n'est pas question de réaffûter les grains d'abrasif. Pour que la meule continue à couper, il faut donc que les grains émoussés se détachent en faisant apparaître de nouveaux grains qui vont à leur tour attaquer le métal dans de bonnes conditions.

Pour travailler des *matières dures*, il faut choisir des *meules tendres* afin que les grains d'abrasif usés se détachent rapidement.

On utilise également des *meules tendres* lorsque la *surface de contact* de la pièce et de la meule est *grande* ou pour obtenir un *débit important.*

Les *meules dures* sont, au contraire, réservées au travail des *métaux tendres* et utilisées également lorsque la *surface de contact* pièce-meule est *étroite.*

Lorsqu'une *meule se lustre* et se charge de métal, c'est l'indice qu'elle est *trop dure* ou que son *grain* est *trop petit.* Il faut donc la retailler au diamant et prendre une passe plus faible. Il faudra choisir un grade plus tendre et un grain plus gros quand on la remplacera.

Lorsqu'une *meule* est *trop tendre*, elle *s'use rapidement*; les grains se détachent avant d'être usés et rayent la surface travaillée.

Enfin, si le *porte-meule* est *de construction légère*, il faut choisir des *meules dures.*

## d) *Structure.*

Entre les grains d'abrasif et les particules d'agglomérant qui lient les différents grains, se trouvent des pores ou vides. Lorsqu'ils sont importants, les grains d'abrasif se trouvent espacés. Dans le cas contraire, ils sont rapprochés. Le numéro de structure est un indice de tassement des grains d'abrasif.

**0-1-2-3, structure dense** : grains très tassés.

**4-5-6, structure normale** : espacement moyen des grains.

**7-8-9-10-11-12, structure ouverte** : grains très écartés.

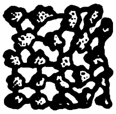


*Fig.* 3. — Coupe d'une meule à structure ouverte.

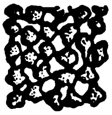


*Fig.* 4. — Coupe d'une meule à structure normale.

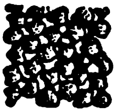


*Fig.* 5. — Coupe d'une meule à structure dense.

Les *figures* 3, 4 et 5 représentent une coupe à grande échelle faite dans trois meules qui ont même grosseur de grain. Supposons que l'effort de liaison des grains entre eux, résultant de l'action de l'agglomérant, soit toujours le même ; on voit que ces trois meules ne diffèrent que par la proportion d'abrasif qui entre dans leur constitution, c'est-à-dire par leur structure.

**Choix de la structure :**

Lorsqu'une meule doit avoir un *grand débit,* il faut, entre deux grains, un espace assez important pour le logement des copeaux. On choisit une *structure ouverte.*

Un choix identique peut être fait lorsque la *surface de contact* pièce-meule est *grande.*

Pour les opérations de *finition,* au contraire, on adoptera des meules à *structure dense.*

## e) *Agglomérants.*

Les principaux agglomérants utilisés pour la fabrication des meules sont : les *argiles* (en particulier le kaolin), le *silicate de soude,* la *bakélite,* le *caoutchouc vulcanisé* et la *gomme laque.*

Le mode de fabrication des meules varie suivant la qualité de l'agglomérant utilisé. On distingue les **meules vitrifiées**, à base d'argiles cuites, les **meules au silicate**, les **meules élastiques**, à base de bakélite, caoutchouc ou gomme laque.

**Meules vitrifiées :**

Ces meules, dont l'agglomérant est constitué par des argiles, sont fabriquées par un procédé analogue à celui qui est employé pour la fabrication de la porcelaine

L'argile finement broyée est mélangée intimement avec l'abrasif. Puis on ajoute la matière solvante et on réalise une pâte homogène que l'on moule à la forme des meules. Les ébauches ainsi obtenues sont portées au four où elles sont chauffées à la température de 1 050°. L'argile entre en fusion ; on laisse alors refroidir lentement les pièces dans le four. L'argile se cristallise, se vitrifie et enrobe solidement les grains d'abrasif.

L'opération, longue et délicate, nécessite une surveillance constante de la température, qui doit être la même dans les différentes parties du four. La cuisson dure une centaine d'heures et le refroidissement environ quinze jours. Les meules vitrifiées sont très poreuses et présentent beaucoup de mordant, l'agglomérant ayant lui-même une certaine valeur abrasive. Elles ne se détériorent ni par la chaleur ni par le contact de l'huile ou de l'eau. Lorsque la cuisson a été bien conduite, ces meules présentent une grande homogénéité.

Cependant, en raison des difficultés que présente la fabrication, le diamètre maximum des meules vitrifiées est de 700 mm.

**Meules au silicate :**

Le silicate de soude, utilisé comme agglomérant, est un liquide visqueux qui a la propriété de durcir lorsqu'il est chauffé et de rester solide après refroidissement.

Pour fabriquer une meule, on réalise un mélange aussi homogène que possible de silicate, d'abrasif et de divers ingrédients destinés à modifier la dureté finale du produit.

La pâte obtenue est moulée, séchée, puis cuite dans un four à la température de 200 à 250°. La cuisson dure de 12 à 70 heures. Le refroidissement, assez rapide, ne dure que quelques heures.

Ce procédé de fabrication est beaucoup plus sûr que le précédent. Aussi peut-on exécuter au silicate des meules de grand diamètre, moulées directement sur des plateaux métalliques.

Les meules au silicate sont moins poreuses que les meules vitrifiées et, à dureté égale, elles présentent moins de mordant.

**Meules élastiques :**

L'agglomérant utilisé peut être de la bakélite, du caoutchouc vulcanisé ou de la gomme laque.

Après avoir mélangé l'agglomérant, l'abrasif, et, s'il y a lieu, un solvant, on obtient, par malaxage, une pâte épaisse, qui peut être étalée en feuille puis découpée ou moulée sous pression dans des moules métalliques.

Les ébauches ainsi obtenues sont cuites à basse température : 150° environ. On peut obtenir, par ce procédé, des meules minces (épaisseur 1 mm) utilisées pour le tronçonnage.

Moins mordantes que les meules vitrifiées, les meules élastiques peuvent supporter, sans se détériorer, un échauffement considérable.

**Choix de l'agglomérant :**

Les *meules vitrifiées* dont le diamètre doit être inférieur à 750 mm sont utilisées pour l'*usinage*, la *rectification*, l'*affûtage* et l'*ébarbage.*

L'agglomérant au *silicate* permet de réaliser des meules de grandes dimensions donnant un *meilleur fini* que les meules vitrifiées.

Les meules à agglomérant *bakélite* sont utilisées pour l'*ébarbage* et le *tronçonnage* à grande vitesse.

Les agglomérants à base de *caoutchouc* ou de *gomme laque* sont indiqués pour la fabrication de meules à grains fins permettant la réalisation de très *beaux finis* (poli spéculaire) avec une *grande précision.*

**Tableau des agglomérants Norton :**

| | | |
|---|---|---|
| Vitrifié ...................... | Symbole | néant. |
| Vitrifié B et ses dérivés ...... | — | BE. BA. |
| Silicate ...................... | — | S. |
| Bakélite et dérivés .......... | — | T TH $T_2$H. |
| Caoutchouc Rubber .......... | — | R. |
| Shellac et ses dérivés ......... | — | LV. |

## 2° Caractéristiques de forme et de dimensions.

Les différentes formes de meules correspondant aux divers emplois sont représentées *figure* 6.

Les *meules plates* permettent l'usinage de surfaces cylindriques, coniques ou plates. Les *meules plates minces* sont utilisées pour le tronçonnage des pièces.

Pour des travaux spéciaux : meulage de profilés, affûtage de scies, de fers de toupies, etc., les meules plates peuvent être livrées à l'un des profils standards représentés *figure* 6.

Les *meules assiette, soucoupe, boisseau conique ou droit* sont utilisées pour l'affûtage des outils : fraises, alésoirs, etc. Ces meules travaillent sur la surface plane perpendiculaire à leur axe de rotation. La *meule cylindre* travaille de la même façon lorsqu'elle est montée sur un plateau lapidaire ou lorsqu'elle est utilisée pour la rectification des surfaces planes. Mais elle peut également, montée sur un moyeu spécial, travailler sur la surface cylindrique.

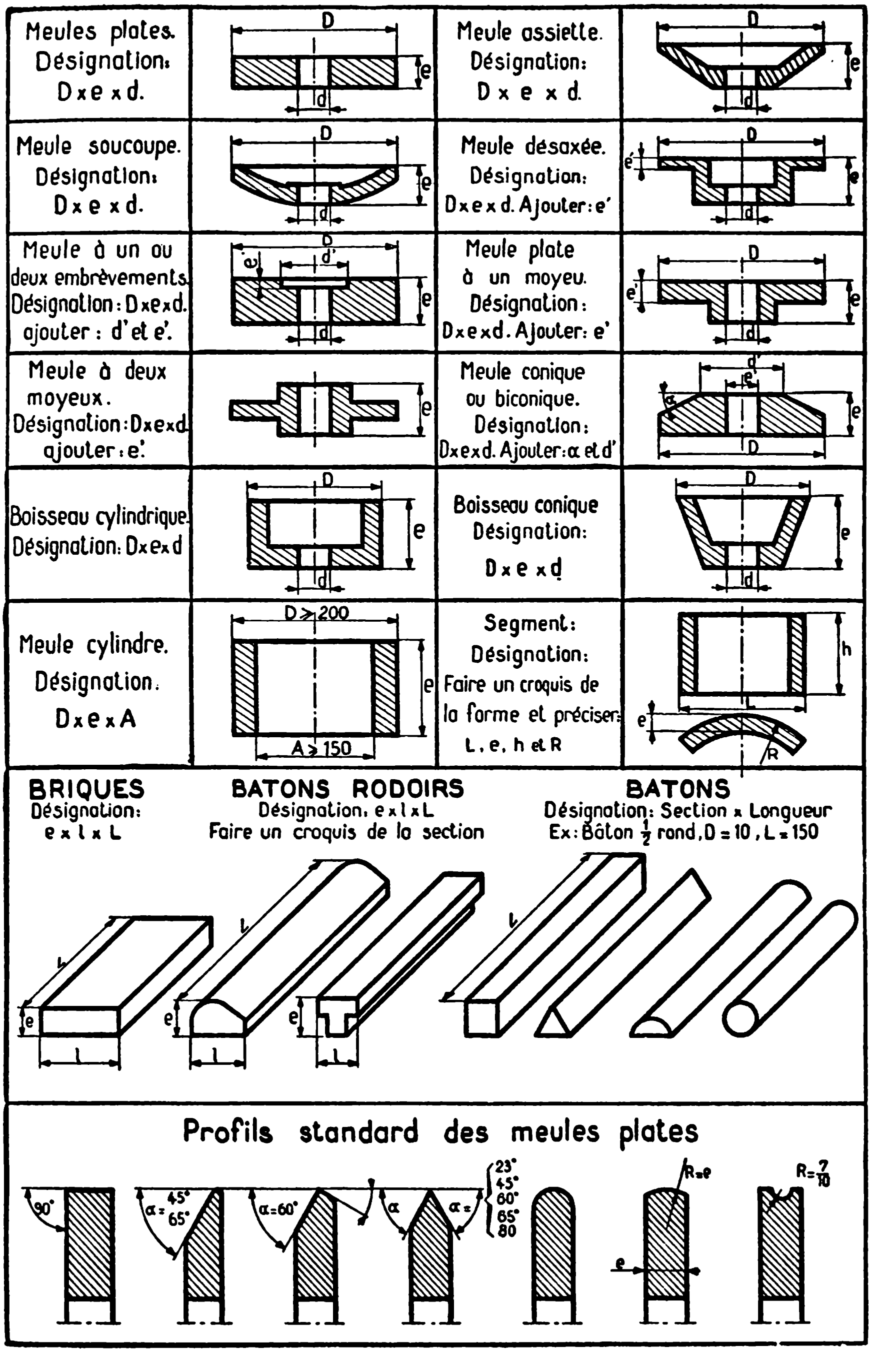



*Fig.* 6. — Principales formes de meules.

Lorsque la meule doit avoir un grand diamètre, on utilise des segments qui sont fixés sur un noyau métallique (voir *fig.* 8).

Les *briques* sont des agglomérés abrasifs de forme parallélépipédique, utilisés généralement à la main. Leur grain est très fin : grosseur de grain 280 environ. On les vend dans le commerce sous le nom de *pierre India.*

Les *bâtons rodoirs* sont des produits abrasifs de section constante (carrée, rectangulaire ou à contour spécial). Ils se montent par un ou plusieurs éléments sur un appareil à roder et travaillent sur une surface paralléle à leur longueur.

Les *bâtons abrasifs* ont une section carrée, triangulaire, demi-ronde ou ronde. Ils peuvent être de forme cylindrique, conique ou tronconique et sont utilisés à la main pour retoucher des pièces trempées : calibres, gabarits, etc.

## D. — Condition de travail des meules

### 1° Vitesse circonférentielle des meules.

Les vitesses circonférentielles limites des meules sont les suivantes :

#### a) *Meules vitrifiées et au silicate.*

**Meules plates et assimilées :**

Grade tendre .................................. 25 m/s
Grade dur .................................. 33 m/s

**Meules cylindriques, assiette, boisseau :**

Grade tendre .................................. 23 m/s
Grade dur .................................. 28 m/s

#### b) *Meules gomme laque ou bakélite.*

**Meules plates :**

Grade tendre .................................. 33 m/s
Grade dur .................................. 50 m/s

**Meules cylindriques, assiette, boisseau, etc. :**

Grade tendre .................................. 25 m/s
Grade dur .................................. 40 m/s

**Meules à tronçonner** .................................. 50 à 80 m/s

#### c) *Meules en caoutchouc vulcanisé.*

Prendre les vitesses des meules en bakélite correspondant au grade tendre.

Il est à noter qu'une variation de vitesse de la meule modifie sa dureté apparente. *Plus la vitesse augmente, plus la meule paraît dure, et inversement.*

## 2° Vitesse circonférentielle de la pièce.

Pour les travaux d'usinage ou de rectification de pièces cylindriques, la vitesse circonférentielle de la pièce varie de 5 à 25 m/mn, le sens de rotation étant le même que celui de la meule. La vitesse doit être plus faible pendant le dégrossissage que pendant la finition.

*La meule paraît plus tendre si la vitesse de la pièce est grande, et inversement.*

Si l'on rapproche cette remarque de celle qui a été faite concernant les vitesses de la meule, on voit qu'il est possible de modifier légèrement la dureté apparente d'une meule en faisant varier la vitesse de la pièce et celle de l'outil.

## 3° Profondeur de passe.

La profondeur des passes est fonction de la grosseur du grain et de la nature du métal travaillé. Elle varie de 0,1 mm à 0,01 mm.

## 4° Vitesse de translation de la pièce par rapport à la meule.

On admet en rectification cylindrique que, pour un tour de la pièce, la meule doit se déplacer de la moitié de sa largeur pour la finition et des trois quarts pour l'ébauche. Si la vitesse de translation est trop faible, l'usure de la meule est inégale et le travail n'est plus convenable.

## 5° Résumé des règles à observer pour effectuer un meulage correct.

a) **Usinage d'un métal dur.**
Choisir un abrasif alumineux et un grade tendre.

b) **Usinage d'un métal tendre.**
Choisir un abrasif siliceux et un grade dur.

c) **Usinage à gros débit.**
Choisir un grain gros et une structure ouverte.

d) **Usinage à faible débit.**
Choisir un grain petit et une structure plus tassée.

e) **Usinage avec grande surface de contact pièce-meule.**
Choisir une meule tendre et une structure ouverte.

f) **Usinage avec faible surface de contact.**
Choisir une meule plus dure et une structure plus tassée.

### 6° Incidents rencontrés en cours de travail.

a) **Une meule se lustre si son *grade* est *trop dur*.** Elle ne coupe plus et échauffe la pièce. Si on ne peut la changer, diminuer la vitesse de la meule ou augmenter celle de la pièce.

b) **Lorsqu'une meule « bourre »**, elle se charge en métal ; son *grain* est *trop petit* ou sa *structure trop tassée* ; il y a lieu de diminuer la profondeur de passe.

c) **Une meule qui s'use trop rapidement** est une meule *trop tendre*. Si on ne peut la changer, augmenter sa vitesse ou diminuer celle de la pièce.

## E. — Rédaction d'un bon de commande de meule

Pour définir avec précision une meule, il faut donner :

1° **Les caractéristiques de forme et de dimensions :**

- *a*) Forme : *plate, assiette, boisseau, etc.* ;
- *b*) Les dimensions qui doivent être indiquées dans l'ordre : *diamètre, épaisseur, alésage.*

2° **Les caractéristiques de constitution :**

- 1° *Abrasif* ;
- 2° *Grosseur de grain* ;
- 3° *Grade* ;
- 4° *Structure* ;
- 5° *Agglomérant.*

EXEMPLE : 1 meule assiette de 100 × 13 × 12,7
38-46-M-5-BE.

Dans l'échelle NORTON :

38 indique que l'abrasif est de l'alundum 38 ;
46 représente l'indice de grosseur ;
M le symbole de grade moyen ;
5 la structure moyenne ;
BE indique que l'agglomérant est vitrifié B.

## F. — Montage des meules

**Les meules, qui sont assez fragiles, doivent être manipulées avec précaution, tout choc devant être évité.**

**Lorsqu'une meule est animée d'un mouvement de rotation, chacune de ses parties est soumise à l'action de la force centrifuge.** Une meule qui n'est pas saine

risque d'éclater. Il est donc nécessaire, avant de monter une meule, de s'assurer qu'elle ne présente pas de défauts ni de fêlures. Il suffit pour cela de la cogner légèrement avec un petit marteau ; le son produit par ce choc doit être très clair.

## 1° Montage des meules travaillant sur la surface cylindrique.

La meule doit être serrée entre deux flasques et centrée soit sur l'axe (*fig.* 7), soit sur les flasques (*fig.* 8).

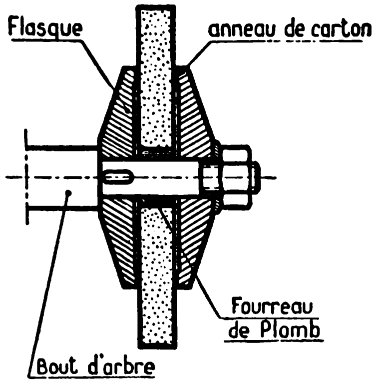



***Fig.* 7. — Montage d'une meule plate sur un arbre.**

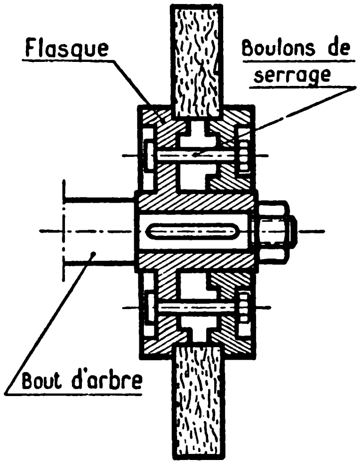



***Fig.* 8. — Montage d'une meule plate sur des flasques.**

Le contact de la meule et des flasques doit se faire par une couronne assez étroite avec interposition de carton ou de papier buvard ; éviter le caoutchouc qui durcit à l'usage.

Les écrous de fixation doivent être serrés juste suffisamment pour produire l'entraînement de la meule.

Le sens du filetage des écrous doit être tel que les forces d'inertie pendant le démarrage tendent à les serrer.

Avant de mettre une meule en service, il faut la laisser tourner à vide pendant quelques minutes puis appliquer progressivement les pièces à usiner, de façon que la meule prenne lentement sa température de régime.

Lorsqu'une meule doit avoir un grand diamètre, elle est constituée par des *segments.* Ces segments sont montés sur un support spécial destiné à les maintenir solidement et à régler leur position. Les segments, de forme trapézoïdale, sont maintenus par des coins métalliques. On interpose des joints en papier buvard entre les coins et les meules, afin de répartir convenablement la pression

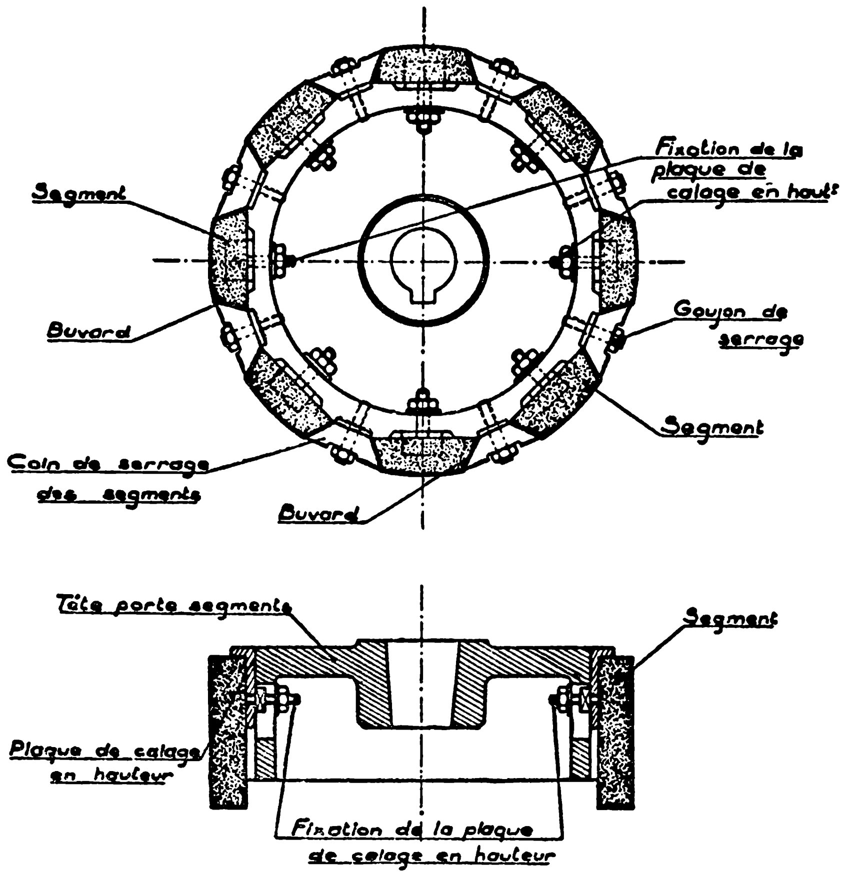



*Fig.* 9. — Meule à segments.

de contact. La meule doit être taillée au diamant avant sa mise en service. La *figure* 9 donne les détails de construction d'une meule à segments.

## 2° Montage des meules en anneau.

Les meules travaillant sur l'une des surfaces perpendiculaires à l'axe de rotation peuvent être collées sur un flasque évidé (meules lapidaires, voir *fig.* 10) ou montées sur un support expansible (voir *fig.* 11).

Ce montage comporte un flasque évidé, alésé au diamètre extérieur de la meule cylindre.

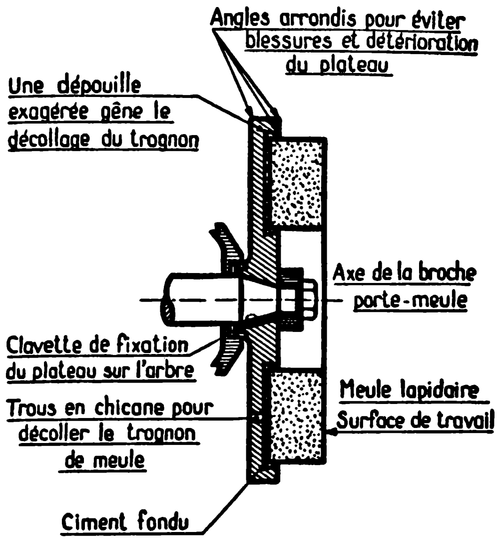



*Fig.* **10. — Meule lapidaire collée sur plateau.**

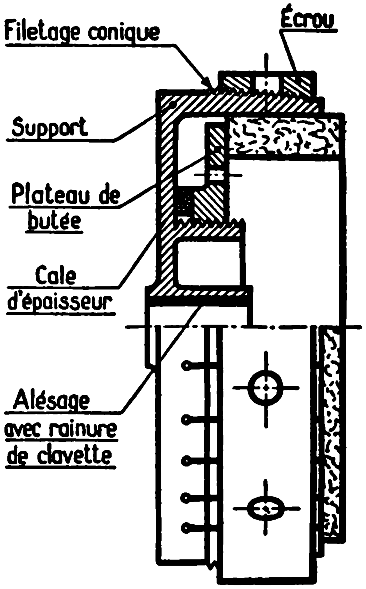



*Fig.* **11. — Meule lapidaire montée sur support expansible.**

**La surface extérieure comporte un filetage conique sur lequel se monte un écrou. Des traits de scie, pratiqués sur le pourtour suivant des génératrices, rendent la pièce déformable. En bloquant l'écrou, la meule se trouve ainsi solidement maintenue. Un plateau intérieur de butée permet de régler la position de la meule avant serrage.**

## G. — Équilibrage des meules

**Les meules qui présenteraient un balourd vibreraient dangereusement au cours de leur rotation. Il est donc nécessaire de les équilibrer soigneusement lorsqu'elles ont été montées sur leur support.**

**L'équilibrage est obtenu par taillage de la meule au diamant. Certains flasques supports de meule comportent trois masselottes réglables qui se déplacent dans une rainure circulaire et qui permettent de parfaire l'équilibrage.**

**On notera également qu'il ne faut pas laisser tremper une partie de la meule dans l'eau afin d'éviter du balourd au démarrage.**

## H. — Appareils de protection

Les meules peuvent se rompre en cours de travail ; leur éclatement constitue un grave danger en raison de leur grande vitesse de rotation.

« Les meules devront être montées ou enveloppées de telle sorte qu'en cas de rupture les fragments soient retenus soit par les organes de montage, soit par l'enveloppe » (décret du 10 juillet 1913). Le *dispositif protecteur* à employer est une enveloppe métallique qui, tout en dégageant suffisamment la meule pour qu'elle puisse effectuer son travail, doit en cas de rupture retenir les fragments projetés. Ce dispositif appelé *carter*, *capot* ou *protecteur* doit être constitué par des tôles d'acier assemblées par rivets ou par soudure.

Les protecteurs en fonte, trop fragiles, sont à éliminer.

L'ouverture du protecteur doit être limitée à l'espace strictement nécessaire pour effectuer le travail.

Lorsque les conditions de travail interdisent l'emploi d'un protecteur (machines à affûter), il est recommandé à l'ouvrier de ne jamais se trouver dans le plan de rotation de la meule, car celui-ci constitue le lieu des trajectoires suivies par les éclats.

## I. — Entretien des meules

Les meules au travail s'usent souvent d'une façon irrégulière, se lustrent ou s'encrassent. Il est donc nécessaire de les retailler, soit pour aviver ou adoucir leur action, soit pour les débarrasser du faux-rond ou pour leur donner un profil déterminé.

Le retaillage d'une meule peut se faire en utilisant :

1° **Des dresseurs à molette en fonte blanche ;**

2° **Des dresseurs à abrasif** (petite meule, carborundum tournant sur un axe tenu par l'opérateur :

3° **Des dresseurs à diamant.**

C'est ce dernier appareil qui est le plus employé, surtout pour les meules de rectification.

L'appareil à diamant est constitué par une tige cylindrique de 15 à 20 mm de diamètre, à l'extrémité de laquelle est fixé, par brasage ou sertissage, un petit morceau de diamant de forme conique. La grosseur du diamant est fonction du diamètre des meules. On choisira un diamant de 1 carat pour une meule de Ø = 300 et de 2 carats pour Ø = 600.

La tige porte-diamant est montée sur un support fixé à la table de la machine. Le déplacement automatique de la meule ou de la table donne au diamant le mouvement convenable.

# LE RODAGE

## A. — État des surfaces usinées

Le travail du métal à l'outil ou à la meule de rectification ne permet pas d'obtenir des surfaces rigoureusement parfaites.

L'étude microscopique de la surface révèle l'existence de plusieurs sortes d'imperfections mises en évidence par l'examen du profil des sections obtenues dans la pièce par deux plans remarquables : le plan perpendiculaire au vecteur vitesse de coupe (voir *fig.* 12 et 13, plan $P_1$) et le plan parallèle au vecteur vitesse de coupe, normal à la surface travaillée (voir *fig.* 12 et 13, plan $P_2$).

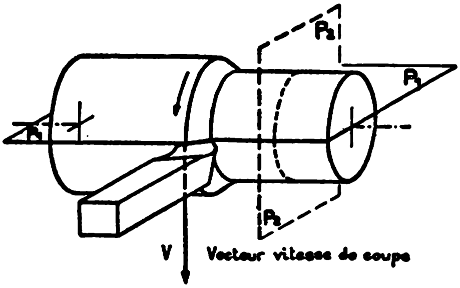



*Fig.* 12. — Plan remarquable correspondant à l'usinage au tour.

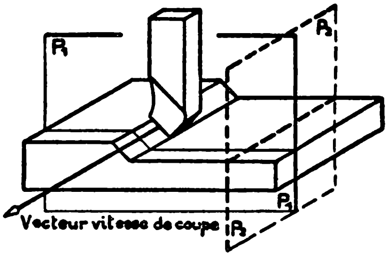



*Fig.* 13. — Plan remarquable correspondant à l'usinage par rabotage.

### 1° Profil déterminé par le plan perpendiculaire au vecteur vitesse de coupe.

Il présente, en général, deux sortes de sinuosités plus ou moins régulières (voir *fig. 14*) :

a) **La sinuosité $S_1$**, à grande périodicité, résulte de l'imprécision de la machine, des tensions internes créées par l'écrouissage du métal au cours de l'usinage, de l'hétérogénéité du métal travaillé, des flexions de l'outil et de son support, de la pièce et de son support, pouvant avoir pour cause le montage mal étudié de la pièce.

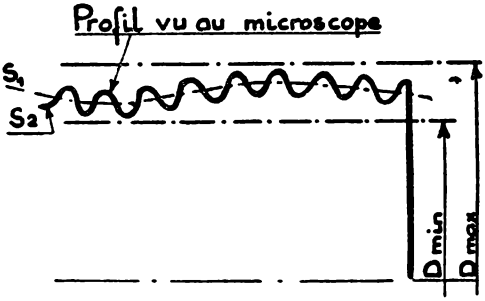



*Fig.* 14. — Profil d'une pièce usinée.

Exemples :

*Rabotage d'une pièce mince mal soutenue* (fig. 15). *Tournage ou rectification d'une pièce flexible présentant un porte-à-faux important* (fig. 16).

b) **La sinuosité** $S_2$, de très faible périodicité, s'ajoute à la précédente. Elle correspond aux sillons laissés dans le métal au cours des passes successives par la pointe de l'outil et caractérise l'état de rugosité de la pièce. Nous avons vu, dans une précédente leçon, que la profondeur des sillons est fonction de la forme de l'outil, de l'avance et de la profondeur de passe.

## 2° Profil déterminé par le plan parallèle au vecteur vitesse de coupe et normal à la surface usinée.

Les procédés d'usinage courants ne permettent pas d'obtenir une forme géométrique précise. Le profil $S_3$ (*fig.* 17) présente des inexactitudes comparables aux sinuosités $S_1$ produites par les mêmes causes.

Le profil d'une surface rabotée ne sera pas parfaitement rectiligne ; la section d'une surface de révolution, qui devrait être une circonférence, présente des parties bombées, des ondulations s'il y a broutement, des facettes lorsque l'usinage final est une rectification (voir *fig.* 16).

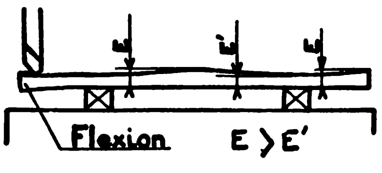



*Fig.* 15. — Surface obtenue après usinage d'une pièce flexible mal supportée.

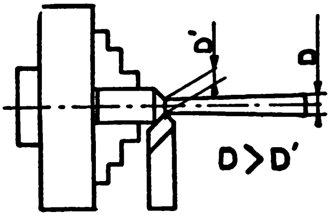



*Fig.* 16. — Forme défectueuse résultant du tournage en l'air d'une pièce trop longue

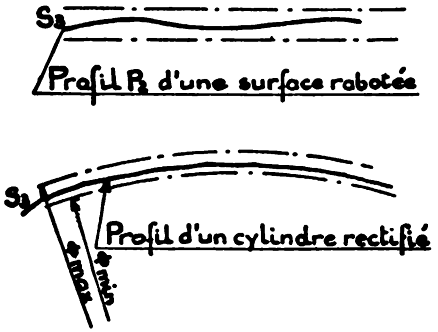



*Fig.* 17. — Profils des surfaces planes et cylindriques.

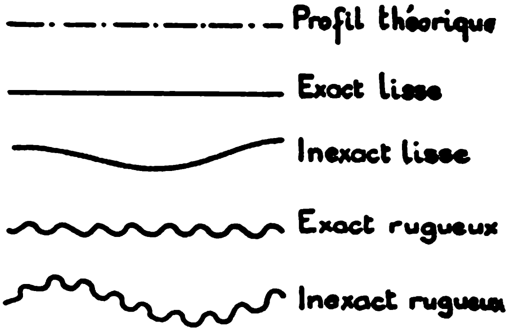



*Fig.* 18. — Différentes formes du profil.

## 3° Classification des surfaces.

L'examen des profils obtenus dans les plans $P_1$ et $P_2$ permet de classer les surfaces.

Si les sinuosités $S_1$ ou $S_2$ n'existent pas, la surface est dite *exacte* ; si la sinuosité $S_3$ n'existe pas, elle est *lisse* ; dans le cas contraire, elle est *rugueuse*. On peut donc avoir (voir *fig.* 18) :

*a*) Des surfaces exactes lisses ;

*b*) Des surfaces inexactes lisses ;

*c*) Des surfaces exactes rugueuses ;

*d*) Des surfaces inexactes rugueuses.

Une surface est précise lorsque tout son profil est compris entre les profils théoriques maximum et minimum correspondant aux tolérances de fabrication choisies.

## 4° Caractéristiques des états des surfaces.

L'existence plus ou moins prononcée des sinuosités $S_1$ et $S_2$ ou $S_3$ caractérise l'état de la surface.

Moins ces sinuosités sont importantes, meilleur est l'état de surface.

Les irrégularités à grande périodicité $S_1$ et $S_2$ peuvent, le plus souvent, être mesurées avec les appareils de contrôle courants d'atelier : pied à coulisse, palmer, comparateur, calibres divers, marbres.

Pour mesurer l'importance des sillons $S_3$ caractérisant la rugosité, on a fait appel à de nouvelles méthodes métrologiques, car les profondeurs à mesurer varient de quelques dixièmes de millimètre à $\frac{1}{10}$ de micron (0,0001 mm).

### a) *Méthodes basées sur l'agrandissement du profil.*

Examen au microscope d'une tranche découpée dans la surface ou dans le moulage de la surface (microscope binoculaire à éclairage rasant ou microscope électronique) ;

Photographie agrandie du profil ;

Enregistrement de l'image du profil par un procédé relevant du même principe que le cinéma sonore (*fig.* 19).

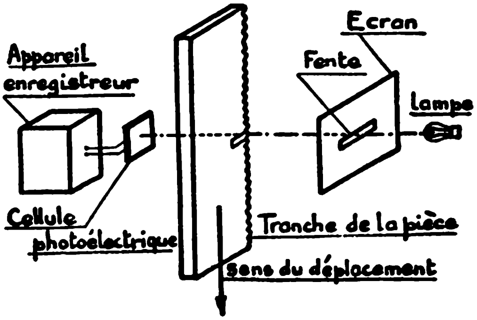



*Fig.* 19. — Examen au microscope d'une tranche de métal usiné. ——→

**b)** ***Méthode d'intégration de M. l'ingénieur Nicolau,*** permettant d'évaluer la valeur de la profondeur moyenne du sillon.

La profondeur moyenne *a* se définit par la distance entre la courbe enveloppe, extérieure au profil $C_1$, et la courbe C tracée de telle sorte que la surface totale des crêtes $s_1 + s_2 + s_3$, etc., soit égale à la surface der creux $s'_1 + s'_2 + s'_3$, etc (voir *fig.* 20).

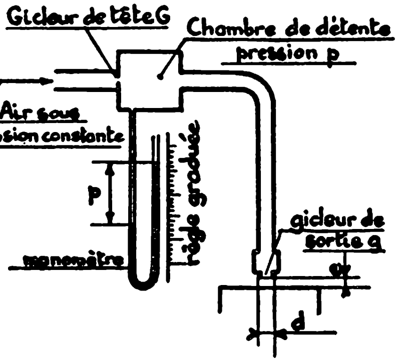



*Fig.* 21. — Micromètre pneumatique Solex.

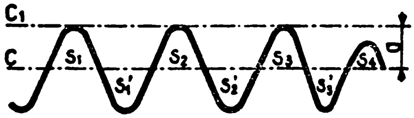



*Fig.* 20. — Photographie agrandie du profil.

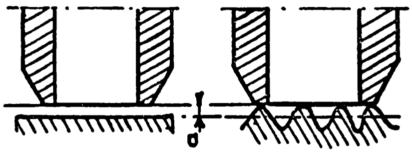



*Fig.* 22. — Palpeur Nicolau.

La détermination de *a* se fait en utilisant le micromètre pneumatique Solex (*fig.* 21) dont le principe est le suivant : on fait arriver de l'hir à pression constante à travers un gicleur de tête G dans une chambre de détente. La pression *p* qui règne dans cette chambre, mesurée par un manomètre à eau, est fonction de la surface d'écoulement au gicleur de sortie, qui est égale à $\pi d \times e$. Lorsque cette surface est petite, c'est-à-dire quand *e* est faible, *p* est voisin de P et inversement.

Lorsqu'on étudie une surface rugueuse, le gicleur de sortie est placé en contact avec la surface de la pièce ; la section d'écoulement de l'air n'est autre que la section des sillons se trouvant sous le gicleur. La valeur de *p*, lue au manomètre sur la règle étalonnée, donne la valeur *a* de la profondeur moyenne définie plus haut (voir *fig.* 22).

## B. — Nécessité de rechercher un état de surface parfait en construction mécanique moderne

### 1° Généralités.

Les conditions de travail des organes mécaniques des machines modernes ont amené les constructeurs à rechercher un état de surface très soigné, c'est-à-dire :

Un usinage parfait pour obtenir les formes géométriques prévues (suppression des inexactitudes $S_1$ et $S_2$) ;

**Un glaçage des surfaces aussi parfait que possible (suppression des sinuosités $S_2$).**

Un tel soin apporté dans l'usinage est devenu une nécessité primordiale :

1° **Pour les surfaces en contact des organes en mouvement devant tourner,** rouler ou glisser à grande vitesse sans jeu : arbres et coussinets, roulements à billes et à rouleaux des machines-outils, notamment des machines à rectifier, des turbines, essoreuses, moteurs à explosion, denture d'engrenages devant rouler les uns sur les autres sans vibration (boîtes de vitesses, réducteurs de vitesse à trains épicycloïdaux, pour lesquels le contact de la roue et de tous les satellites est indispensable) ; des cylindres de moteurs à explosion qui doivent avoir une usure minimum, etc.

2° **Pour les surfaces dont le contact doit assurer l'étanchéité** aux fluides à basse ou haute pression :

Siège de robinets ;

Soupapes de moteurs à explosion ;

Pompes d'injection des moteurs Diesel ; l'étanchéité entre piston et cylindre est réalisée par la précision d'ajustement, le jeu de fonctionnement étant d'environ $\frac{1}{1000}$ de mm et la pression du combustible 250 kgf/cm².

3° **Dans la fabrication des calibres et outillages de vérification :**

Marbres et règles de vérification ;

Cales étalons ;

Calibres et tampons de vérification.

Pour ces appareils, c'est surtout la question de mesure qui nécessite un état de surface parfait. La mesure des cales étalons par les méthodes interférentielles ne peut donner des résultats précis que si le plan a été obtenu avec une précision de l'ordre de quelques centièmes de micron :

$$0{,}01\ \mu = 0{,}000\,01\ \text{mm}.$$

Par suite de la déformation élastique des aspérités, la mesure d'un tampon ou d'un calibre mâchoire est fonction de la pression du comparateur ou des cales étalons utilisées. L'incertitude dans la mesure peut être de 3 à 5 μ si les surfaces sont simplement pierrées, tandis que les tolérances de fabrication sont du même ordre.

## 2° Importance d'un bon état de surfaces pour les pièces de frottement.

Il a été reconnu depuis longtemps que la couche extérieure d'une pièce polie présente des propriétés physiques et chimiques différentes du milieu interne ; elle offre, notamment, une résistance très grande à la corrosion par l'air, même humide, ce qui explique que, de tout temps, le polissage a été utilisé pour l'entretien des pièces métalliques.

Nous allons voir maintenant comment l'amélioration de l'état des surfaces en contact, dans le cas de pièces en mouvement relatif, peut considérablement diminuer l'usure.

Considérons un arbre tournant dans un coussinet : les deux pièces ont été usinées proprement à l'outil ou rectifiées. L'arbre doit avoir un diamètre légèrement inférieur à celui du coussinet, il transmet au coussinet un effort qui est essentiellement variable tant en intensité qu'en direction, en raison de la variation périodique des efforts moteurs et résistants.

Théoriquement, le contact se fait suivant une génératrice et, en raison des déformations élastiques des pièces, le contact se produit suivant un rectangle très étroit dont l'axe longitudinal est la génératrice du tourillon.

Désignons par F l'effort à l'appui, $l$ la longueur du tourillon et $e$ la largeur du petit rectangle de contact dont la surface $s = l \times e$ (voir *fig.* 23).

La pression de contact est : $p = \frac{F}{s} = \frac{F}{l \times e}$.

Elle ne doit pas être exagérément grande pour que le fonctionnement du palier soit correct. Or $p$ augmente si $e$ diminue. Pour que $e$ soit maximum, il est nécessaire que le coussinet et l'arbre aient même rayon de courbure au point de contact, ce qui impose un jeu de fonctionnement minimum (tolérances de fabrication très serrées) et des directrices parfaitement circulaires pour l'arbre et le coussinet (usinage parfait en ce qui concerne les formes géométriques). En réalité, l'arbre et le coussinet n'ont pas une forme cylindrique parfaite, si bien que l'appui ne se produit que sur un ou plusieurs points pour lesquels la pression de contact augmente considérablement ; elle intéresse fort heureusement un volume de métal assez étendu sous chaque surface élémentaire de contact, si bien que la pression peut atteindre, sans inconvénient, quatre à cinq fois la contrainte de rupture du métal le moins résistant (voir *fig.* 24). Mais si cette limite est dépassée, des petites particules coniques de métal se détachent : le métal est piqué et il peut même s'écailler si la contrainte devient plus importante.

D'autre part, le mouvement de l'arbre dans le coussinet crée un travail de frottement, proportionnel à l'effort normal F et au coefficient de frottement, qui

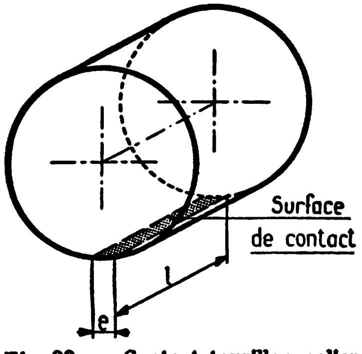



**Fig. 23. — Contact tourillon palier.**

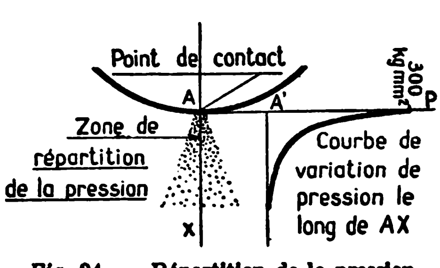



**Fig. 24. — Répartition de la pression sous un contact.**

se transforme en chaleur. Cette chaleur va porter le métal, au droit des surfaces de contact, à des températures de 500 à 1 000° sur une profondeur de quelques millionièmes de millimètre. Dans ces conditions, on conçoit que le métal puisse être détaché en fine poussière : c'est le phénomène d'usure. Fort heureusement, l'usure se trouve limitée parce que les points de contact sont continuellement changeants, les efforts appliqués étant constamment variables. Mais il reste évident que la quantité de chaleur dégagée produira des effets moindres si elle se trouve répartie sur une surface de contact plus grande (état de surface parfait) et si le coefficient de frottement est plus faible (surface lisse, graissage).

Nous avons supposé jusqu'à présent que le contact métal sur métal pouvait se produire. Lorsqu'un film d'huile peut se former, une couche d'huile adhère à l'arbre, une autre au coussinet et le mouvement se transforme en un glissement d'un feuillet d'huile sur un autre si les surfaces métalliques sont bien lisses. Par contre, si elles présentent de légères aspérités, le mouvement va provoquer le tourbillonnement des molécules d'huile. Ce mouvement parasite échauffe l'huile, diminue sa viscosité ; le film d'huile ne peut plus se former et le contact métallique se produisant à nouveau, on retombe dans le cas précédemment étudié.

Les considérations qui viennent d'être développées montrent combien il est impérieux, si l'on veut diminuer l'usure des pièces en mouvement, de limiter le jeu au strict minimum et de rechercher un état des surfaces aussi parfait que possible. Ces considérations résultent des études systématiques faites par l'Ingénieur Outin.

## C. — Méthodes d'usinage destinées à améliorer l'état de surface des pièces

Pour donner aux pièces, à la fois, une forme géométrique exacte sans aspérités, et une cote précise, la tolérance de fabrication pouvant être de l'ordre de 0,1 à 0,5 micron (0,000 1 à 0,000 5 mm), on complète le travail d'usinage courant à l'outil ou à la meule de rectification par une opération de finition qui porte le nom de *rodage*, ou *rectification miroir*. Le rodage, anciennement connu, était une opération manuelle. L'industrie moderne a mécanisé les méthodes de rodage et la nouvelle technique d'usinage a pris le nom de rectification miroir et parfois de *superfinition*, ce dernier terme paraissant se rapporter plus spécialement aux opérations où l'on utilise des bâtons rodoirs, qui sont des petites meules à grains très fins.

### 1° Rodage manuel.

#### a) *Rodage plan.*

Sur un marbre parfaitement plan, on répand un abrasif finement pulvérisé et mélangé à un corps gras afin qu'il puisse se répandre uniformément en une couche très mince.

La surface plane à dresser, soigneusement ébauchée, est appliquée sur le marbre ; en exerçant sur la pièce une légère pression, on lui communique un mouvement louvoyant quelconque (trajectoire en forme de 8). Sous la pression de la pièce, que nous supposerons en acier traité, les grains d'abrasif pénètrent en partie dans le métal plus mou : la fonte qui constitue le marbre. Ces grains, débordant légèrement, constituent une multitude de petits outils qui détachent de la pièce des copeaux microscopiques. Le marbre qui sert de support à tous ces petits outils est appelé *rodoir*. Les dimensions des grains d'abrasif étant bien inférieures à la profondeur des sillons existant sur la pièce, seules les aspérités de la partie à usiner sont attaquées. Lorsque le travail est terminé, la surface rodée se trouve glacée et s'applique parfaitement sur le marbre : si ce dernier est un plan parfait, la pièce sera également plane.

On ne peut réaliser un très grand nombre d'opérations de rodage avec le même marbre sans s'assurer qu'il est resté bien plan.

Tandis que la majorité des grains d'abrasif s'incruste dans la fonte du marbre, une petite quantité d'abrasif s'incruste aussi dans la pièce qui va ainsi user le marbre. Il faut donc, au cours du travail, vérifier la planéité du rodoir ; sans cette précaution, les deux pièces peuvent être gauches tout en s'épousant parfaitement. Les marbres doivent donc être périodiquement dressés ; cette rectification est obtenue par rodage consécutif de trois marbres l'un sur l'autre. Lorsque les trois marbres portent indifféremment l'un sur l'autre, on est certain que leur surface est plane. Si on n'avait utilisé que deux marbres, la surface de contact aurait pu être gauche, convexe pour l'un, concave pour l'autre. On conçoit très bien que la vérification de ces deux marbres avec un troisième révélerait automatiquement une erreur, car ce dernier marbre ne pourrait porter à la fois sur une surface convexe et sur une surface concave.

### b) *Rodage cylindrique.*

#### Rodage des alésages.

On utilise des rodoirs cylindriques expansibles en cuivre, laiton ou acier ; on provoque leur expansibilité au moyen d'un coin ou d'une goupille conique (voir *fig.* 25).

La pièce, dont le diamètre est inférieur à la cote prévue de 1 ou 2/100 de mm, est montée sur un touret et parfaitement centrée ; la vitesse de coupe adoptée est de 1 500 m/mn.

La longueur du rodoir doit être inférieure à celle de l'alésage ; il est tenu à la main par l'opérateur qui lui communique un mouvement assez lent de va-et-vient. Le rodoir peut être monté sur un ensemble de chariots analogue à celui d'un tour ; ainsi sont facilités à la fois le déplacement et le rechargement en abrasif du rodoir.

Pour charger un rodoir on peut, avant de l'introduire, le recouvrir d'une légère couche d'huile mélangée à de la poudre abrasive. Cette méthode a l'inconvénient de donner de l'entrée à la pièce. Il est préférable que l'abrasif soit incorporé, avant toute opération, au métal qui constitue le rodoir. Pour cela, on roule

le rodoir entre deux marbres ; sur le marbre fixe inférieur en acier a été répandu le mélange abrasif. Le marbre supérieur en acier trempé, appuyé sur le rodoir, est animé d'un mouvement de translation produisant ainsi la rotation de l'outil (voir *fig.* 26).

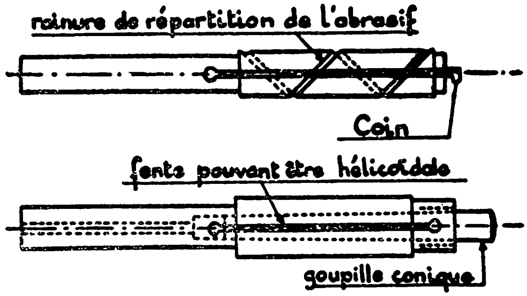



*Fig.* 25. — Rodoirs cylindriques pour alésages.

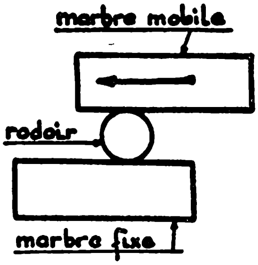



*Fig.* 26. — Chargement d'un rodoir cylindrique.

**Rodage des cylindres.**

Le procédé de travail est identique. L'outil utilisé est une douille fendue expansible ou un rodoir en deux pièces dont on peut faire varier l'écartement au moyen de boulons (voir *fig.* 27).

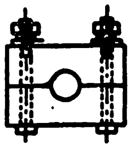


*Fig.* 27. — Rodoirs expansibles pour cylindres.

## 2° Rodage mécanique.

Tous les procédés de rodage à la main sont lents et coûteux ; la précision obtenue dépend, pour beaucoup, de l'habileté des ouvriers. Pour les fabrications de série, on a cherché à rendre ce travail entièrement mécanique. Des machines à roder ont été construites.

Les machines de rodage mécanique sont établies conformément aux principes du rodage manuel. Elles comprennent toutes un rodoir, son support et son mécanisme d'entraînement, un support de pièce et son mécanisme d'entraînement enfin un dispositif spécial adapté au support de pièce ou au rodoir et destiné à assurer la pression constante entre le rodoir et la pièce à roder.

### a) *Rodage des pièces planes (voir* fig. 28).

Le rodoir est constitué par une couronne en fonte à face rigoureusement plane, disposée à la partie inférieure ; son axe vertical est animé d'un mouvement de rotation assez lent. Les pièces à roder, qui doivent avoir la même épaisseur, sont posées sur ce plateau ; elles sont disposées dans les évidements exécutés à la demande des pièces, dans un disque dont l'épaisseur est plus faible que celle des pièces. Une couronne en fonte, dont la face plane est parallèle à la première, exerce sur les pièces une pression élastique constante ; elle est fixe en rotation et montée flottante sur son axe.

Le disque intermédiaire est claveté sur un arbre excentré par rapport à l'axe des couronnes.

Cet arbre est animé d'un double mouvement :

— *Une rotation autour de son axe* dans le même sens que la couronne inférieure mais avec une vitesse moitié moins grande. Ainsi la vitesse relative des surfaces supérieure et inférieure des pièces est la même par rapport aux deux couronnes correspondantes ;

— *Une rotation autour de l'axe des couronnes* (mouvement épicycloïdal) permet aux pièces de balayer toute la surface du rodoir.

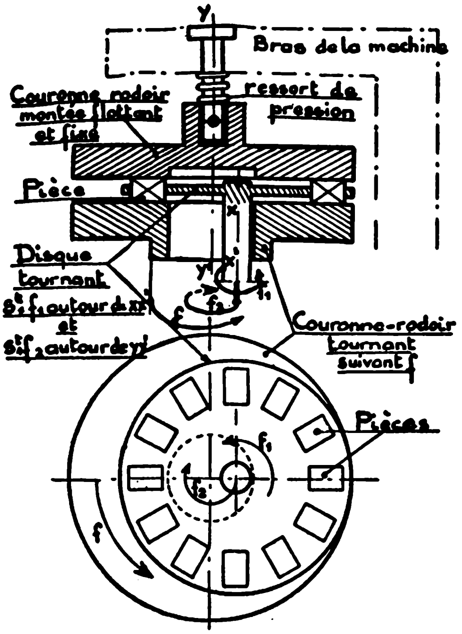



*Fig.* 28. — Machine de rodage des surfaces planes.

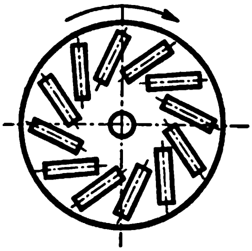


*Fig.* 29. — Machine de rodage des pièces cylindriques.

## b) *Rodage des pièces cylindriques.*

Les machines utilisées ne diffèrent des précédentes que par le disque d'entraînement des pièces qui est monté fou sur un axe excentré. Ce sont les pièces entraînées par le plateau inférieur qui produisent la rotation du disque ajouré et, par suite de l'excentrement de son axe, leur propre déplacement radial.

Pour que le rodage soit bien régulier sur toute la longueur du cylindre, on donne à l'axe des pièces une direction oblique par rapport au rayon correspondant à l'une de ses extrémités (voir *fig.* 29).

Dans certaines machines les deux plateaux peuvent tourner en sens inverse. Les deux machines à roder des surfaces cylindriques et planes exigent que les pièces à usiner aient la même cote. D'autre part, le travail ne peut être convenable que si les couronnes planes sont fréquemment redressées, opérations souvent beaucoup plus longues que le rodage des pièces.

Pour augmenter le rendement de ces machines, les couronnes en fonte peuvent être remplacées par des meules à grain très fin : grosseur 600.

c) ***Rodage des alésages.***

Les machines utilisées ressemblent à des machines à percer. La pièce est fixée verticalement sur la table horizontale de la machine tandis que la broche porte-rodoir est animée de deux mouvements conjugués :

1° *Un mouvement de rotation* à commande mécanique, vitesse de 150 à 300 m/mn ;

2° *Un mouvement vertical de translation alternative* à commande hydraulique, vitesse de 1 à 15 m/mn.

Le rodoir est constitué par une carcasse métallique sur laquelle sont montés des pierres à roder ou des prismes de fonte. Un jeu de doubles cônes, généralement opposés, assure l'expansibilité du rodoir tout en permettant aux pierres de s'orienter en cours de travail pour produire un cylindrage parfait.

En outre, un système de commande micrométrique permet de régler rapidement l'expansibilité du rodoir et de la limiter à la cote prévue. La *figure* 30 donne le schéma de principe d'un rodoir.

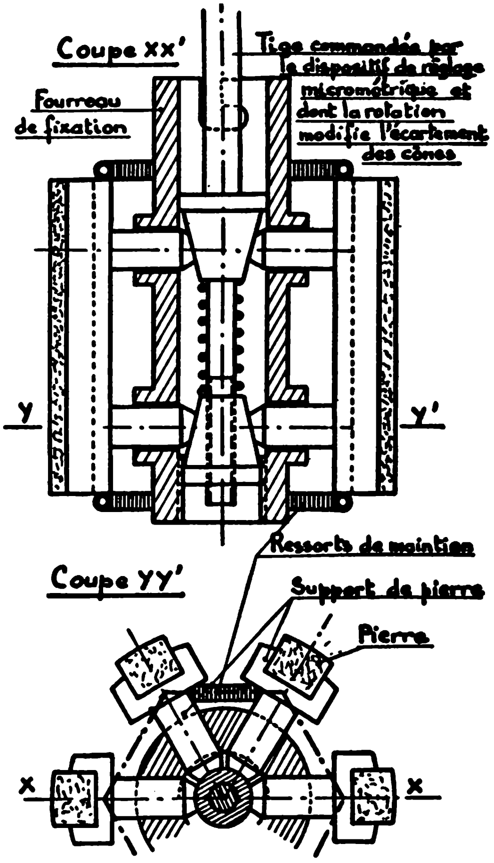



*Fig.* 30. — Rodoir pour rodage des alésages.

Il est à noter que l'alésage à l'outil diamant, à grande vitesse, a permis de supprimer la rectification intérieure avant rodage et, de ce fait, l'opération de glaçage, souvent discutée, s'est généralisée.

## D. — Éléments constituant les outils

### 1° Les abrasifs.

Les abrasifs les plus utilisés sont l'émeri, le carborundum, l'alundum, le vert de chrome et la poussière de diamant.

Les poudres abrasives utilisées correspondent à la grosseur désignée dans l'échelle Norton par 2F, 3F, 4F.

## 2° Les rodoirs métalliques.

On utilise des rodoirs en cuivre, en laiton, en fonte et en acier doux laminé.

Le cuivre, le laiton et l'acier donnent des rodoirs plus mordants que la fonte ; mais les rodoirs exécutés en fonte douce sans piqûres s'usent moins.

Si on caractérise par 1 l'usure de la fonte, celle de l'acier sera 1,3 et celle du cuivre 2,6. Aussi la fonte est-elle préférée chaque fois que le rodoir ne doit pas supporter des efforts de flexion exagérés.

## 3° Les lubrifiants.

On utilise l'huile minérale et l'huile de lard qui donnent de meilleurs résultats avec les rodoirs en acier et en cuivre qu'avec ceux en fonte. L'essence et le pétrole sont les meilleurs lubrifiants pour les rodoirs en fonte. L'essence de térébenthine paraît moins indiquée que le pétrole ou l'essence minérale.

## 4° Pression de rodage.

La pression maximum admise pour le rodage paraît être de 17,5 $N/cm^2$.

# LA SUPERFINITION

On réserve le nom de superfinition à une opération de parachèvement des surfaces cylindriques extérieures, au moyen de pierres taillées au rayon de la pièce et disposées parallèlement à l'axe de celle-ci (voir *figure* 31).

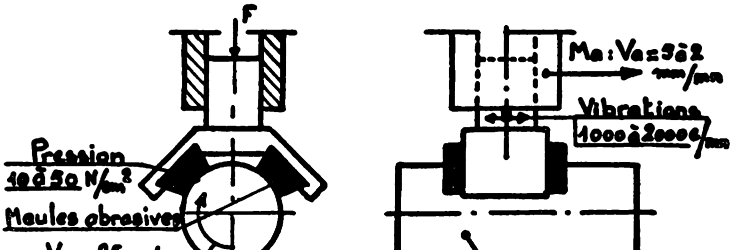



*Fig.* 31. — Principe de la machine de superfinition de pièces cylindriques.

La pièce est en mouvement de rotation continu à la vitesse de 25 m/mn. Le rodoir est animé d'un mouvement rapide de translation alternée, parallèlement à l'axe de la pièce : fréquence 1 000 à 2 000 coups par minute. L'avance est faible : 2 à 5 mm/mn en ébauche, 1 à 2 mm/mn en finition. La pression de contact est comprise entre 10 et 50 $N/cm^2$.

# La vitesse de coupe

Le prix de revient d'un travail exécuté aux machines-outils dépend de la rapidité de l'usinage ; il est donc fonction de la vitesse de coupe. Il appartient aux services de préparation du travail ou même à l'ouvrier de choisir judicieusement cette vitesse, afin d'obtenir un rendement maximum des machines et des outils.

Le mouvement de coupe des principales machines-outils est :

— pour le **tour**, la *rotation de la pièce*,
— pour la **fraiseuse**, la *rotation de l'outil* (fraise),
— pour la **perceuse**, la *rotation de l'outil* (foret),
— pour l'**étau-limeur**, la *translation alternative de l'outil.*

On appelle *vitesse de coupe* d'un outil la vitesse d'un point commun à l'arête tranchante et à la pièce qui serait animée du mouvement de coupe.

La vitesse de coupe s'exprime en *mètres par minute.* Lorsque la pièce se trouve en rotation, c'est le point le plus éloigné de l'axe de rotation qui est considéré.

## APPLICATIONS

## A. — Le mouvement de coupe est une rotation

### 1° Tour.

La vitesse de coupe est la vitesse circonférentielle d'un point de la *surface extérieure de la pièce* : point A (*fig.* 1).

### 2° Perceuse.

La vitesse de coupe est la vitesse d'un point de la *surface extérieure du foret* : point A (*fig.* 2).

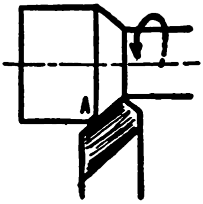



*Fig.* 1. — Tournage.

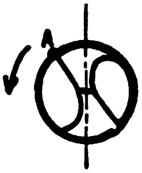



*Fig.* 2. — Perçage.

### 3° Fraiseuse.

Pour une *fraise cylindrique*, la vitesse de coupe est la vitesse d'un point de la *surface extérieure de la fraise* : point A (*fig.* 3).

Pour une *fraise conique*, le point à considérer sera le point A, commun à la fraise et à la pièce (*fig.* 4).

Dans ces différents cas, la vitesse est donnée par la formule :

$$V = \pi \cdot D \cdot n \left\{ \begin{array}{l} V : \text{vitesse de coupe en } \textit{mètres par minute.} \\ D : \text{diamètre de la pièce, du foret, de la fraise en } \textit{mètres.} \\ n : \text{en } \textit{nombre de tours par minute.} \end{array} \right.$$

Il appartient à l'exécutant de fixer la vitesse de la machine. C'est donc le nombre de tours par minute, $n$, qu'il est intéressant de connaître.

La formule précédente donne :

$$n = \frac{V}{\pi D}.$$

Si on exprime D en mm, cette formule devient :

$$n = \frac{1\,000\,V}{\pi D},$$

où

$$n \simeq 300 \frac{V}{D}.$$

$n$ est exprimé en tr/mn ; V, en m/mn. D, en m

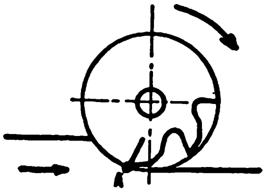


*Fig.* 3. — Fraisage cylindrique.

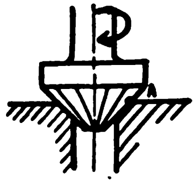



*Fig.* 4. — Fraisage conique.

**Exemple de calcul :**

Chariotage lubrifié en ébauche d'acier demi-dur.

V = 30 m/mn. Diamètre de la pièce : 60 mm.

On a :

$$n = 300 \times \frac{30}{60} = 150 \text{ tr/mn.}$$

## B. — Le mouvement de coupe est rectiligne alternatif (Rabotage à l'étau-limeur)

La vitesse de coupe est la vitesse moyenne d'un point quelconque de l'arête tranchante de l'outil pendant une course de travail.

**Application :**

*Considérons un étau-limeur qui bat* n = 25 coups à la minute; *la course étant de* c = 200 mm, *nous nous proposons de calculer la vitesse de coupe.*

Nous savons que la vitesse moyenne d'un mouvement est donnée par la relation :

$$\text{vitesse} = \frac{\text{espace parcouru}}{\text{temps de déplacement}}.$$

Ici, l'espace parcouru est la course $c = 200$ mm $= 0{,}200$ m.

Pour évaluer le temps, en minutes, mis par l'outil pour parcourir la course de travail, nous supposerons, afin de simplifier le problème, que la durée de cette course égale celle du retour.

Un coup comprenant une course aller et une course retour, la durée d'un battement sera :

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{25} \text{ de mn,}$$

et le temps pour une course sera :

$$\frac{1}{2n} = \frac{1}{50} \text{ de mn.}$$

La vitesse de coupe est la vitesse moyenne de l'outil pendant une course :

$$V = \frac{c}{\frac{1}{2n}} = 2\,cn = \frac{0{,}200}{\frac{1}{50}} = 50 \times 0{,}200 = 10 \text{ m/mn.}$$

Retenons donc la formule donnant la vitesse de coupe pour un étau-limeur :

$$V = 2cn \left\{ \begin{array}{l} V : \text{vitesse en } \textit{m/mn}, \\ c : \text{course en } \textit{mètres}, \\ n : \text{nombre de } \textit{coups par minute}. \end{array} \right.$$

En général, on connaît V et on calcule le nombre de coups par minute.

La formule précédente donne :

$$n = \frac{V}{2c}$$

$n$ est exprimé en coups/mn ; V, en m/mn ; $c$, en m/mn.

$c$ (course de l'outil) comprend la longueur de la pièce, augmentée des dégagements de l'outil (environ 5 à 10 mm de chaque côté de la pièce).

## VALEUR DE LA VITESSE DE COUPE

L'expérience a montré que pour un travail déterminé :

1° Si l'on adopte une vitesse de coupe très grande, l'outil s'use très vite (outil grillé) ;

2° Si l'on adopte une vitesse très faible, l'outil s'use assez rapidement, et le temps mis pour l'exécution de la pièce est exagéré ;

3° Il existe une vitesse intermédiaire pour laquelle l'usure de l'outil est minimum.

Cette vitesse de coupe s'appelle **vitesse de moindre usure.**

Elle varie :

1° **Avec le métal travaillé.**

Elle est plus faible pour les métaux durs que pour les métaux tendres.

2° **Avec la nature du métal qui constitue l'outil.**

Elle est plus grande pour les outils en acier rapide que pour les outils en acier fondu au carbone.

3° **Avec les conditions de lubrification.**

La vitesse de moindre usure augmente si on arrose abondamment l'extrémité de l'outil.

4° **Avec le mode de travail des outils.**

*Exemple* : la vitesse de coupe pour un outil d'étau-limeur qui subit un choc à chaque passe, sera plus faible que pour le même outil monté sur un tour.

5° **Avec la section du copeau.**

La vitesse de coupe sera plus grande pour des travaux de finition à faible section du copeau que pour l'ébauche de pièces.

Comme première approximation, s'il s'agit de tournage, fraisage et perçage pour du travail à sec, en ébauche, on adoptera les vitesses indiquées sur le *tableau ci-après.*

| MATIÈRES TRAVAILLÉES | MÉTAL OU ALLIAGE QUI CONSTITUE L'OUTIL | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ACIER RAPIDE ORDINAIRE | ACIER RAPIDE SUPÉRIEUR | CARBURE POUR GRANDE VITESSE SANS CHOC | CARBURE POUR MOYENNE VITESSE SANS CHOC | CARBURE POUR ÉBAUCHE AVEC CHOC | CARBURE POUR FONTE |
| Acier doux $(Rr)_e = 450\ N/mm^2$. | 20 m/mn | 24 m/mn | 200 m/mn | 100 m/mn | 50 m/mn | |
| Acier $\frac{1}{2}$ dur $(Rr)_e = 650\ N/mm^2$. | 16 | 20 | 160 | 80 | 40 | |
| Acier dur $(Rr)_e = 750\ N/mm^2$. | 12 | 16 | 140 | 70 | 35 | |
| Acier extra-dur $(Rr)_e = 900\ N/mm^2$. | 8 | 10 | 110 | 60 | 30 | |
| Acier traité $(Rr)_e = 1100\ N/mm^2$. | 4 | 5 | 80 | 40 | 20 | |
| Fonte grise à cœur. | 25 | 30 | | | | 80 |
| Fonte dure et croûte de fonte. | 4 | 5 | | | | 20 |
| Bronze. | 30 | 40 | | | | |
| Aluminium et alliages. | 80 | 120 | | | | |

***Dans le cas d'*usinage abondamment lubrifié, *multiplier par* $\frac{3}{2}$ *les valeurs de la vitesse de coupe données sur le tableau.***

*Dans le cas de* travaux de finition, *multiplier les valeurs trouvées pour la vitesse de coupe par* $\frac{3}{2}$.

*Pour les* travaux de rabotage avec outil en acier rapide, *prendre les* $\frac{2}{3}$ *des valeurs figurant au* tableau.

Dans les ateliers, on utilise les abaques établis en tenant compte des dimensions du copeau et aussi de la forme des outils utilisés.

Les planches des pages 183 à 186 reproduisent ces abaques.

| | |
|---|---|
| PLANCHES POUR OUTILS EN ACIER RAPIDE | Mortaisage, rabotage<br>Fraisage, tournage<br>Perçage, alésage. |

# MÉTHODE DE CALCUL MENTAL RAPIDE DES VITESSES DE COUPE

## A. — Le mouvement de coupe est une rotation : tournage, fraisage, perçage, alésage

Lorsque le mouvement de coupe est une rotation, le conducteur de la machine doit connaître le nombre de tours de rotation de la broche par minute. Ce nombre de tours par minute est donné par la relation

$$n = \frac{V}{\pi d}.$$

Pour un même travail, V est constante ; $n$ ne dépend que du diamètre $d$ de la pièce ou de l'outil (foret, alésoir, fraise).

Si $d = d_1$, on a :

$$V = \pi d_1 n_1.$$

Si $d = d_2$, on a :

$$V = \pi d_2 n_2.$$

D'où :

$$\pi d_1 n_1 = \pi d_2 n_2$$

$$d_1 n_1 = d_2 n_2.$$

Par suite :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}, \qquad \text{et} \qquad n_1 = n_2 \times \frac{d_2}{d_1}.$$

Les nombres de tours par minute sont inversement proportionnels aux diamètres.

Si nous connaissons $n_2$ et $d_2$ il est facile de trouver $n_1$.

## 1° Applications.

La formule $n = \frac{V}{\pi d}$ donne

**avec des outils en acier rapide supérieur :**

— *Pour le travail de l'acier doux lubrifié en ébauche :*

$$V = 24 \times \frac{3}{2} = 36 \text{ m/mn.}$$

$$\text{Si } d_1 = 120 \text{ mm, } n_1 \simeq 100 \text{ tr/mn.}$$
$$\text{Si } d_2 = 12 \text{ mm, } n_2 \simeq 1\,000 \text{ tr/mn.}$$

— *Pour le travail de l'acier demi-dur lubrifié en ébauche et la fonte grise à sec ;*

$$V = 20 \times \frac{3}{2} = 30 \text{ m/mn.}$$

$$\text{Si } d_1 = 100 \text{ mm, } n_1 \simeq 100 \text{ tr/mn.}$$
$$\text{Si } d_2 = 10 \text{ mm, } n_2 \simeq 1\,000 \text{ tr/mn.}$$

— *Pour le travail de l'acier dur lubrifié en ébauche et l'acier doux à sec :*

$$V = 16 \times \frac{3}{2} = 24 \text{ m/mn.}$$

$$\text{Si } d_1 = 80 \text{ mm, } n_1 = 100 \text{ tr/mn.}$$
$$\text{Si } d_2 = 8 \text{ mm, } n_2 = 1\,000 \text{ tr/mn.}$$

Retenons les chiffres suivants pour outils en A. R. S. et travail lubrifié en ébauche :

| | |
|---|---|
| *Acier doux* | : $d_1 = 120$, $n_1 = 100$. |
| *Acier demi-dur* | : $d_1 = 100$, $n_1 = 100$. |
| *Acier dur* | : $d_1 = 80$, $n_1 = 100$. |

Pour travail à sec, multiplier les valeurs de $n$ par $\frac{2}{3}$ et, pour du travail de finition, multiplier les valeurs de $n$ par $\frac{3}{2}$.

## 2° Calculs pratiques.

**Outils en acier rapide supérieur, travail lubrifié.**

*Tournage.* Acier demi-dur : $d_1 = 30$ mm.

En ébauche : $n_1 = 100 \times \frac{100}{30} \simeq 330$ tr/mn.

*Fraisage.* Acier dur :

$$d_1 = 120 \text{ mm.}$$

En ébauche :

$$n_1 = 100 \times \frac{80}{120} = 100 \times \frac{2}{3} \simeq 66 \text{ tr/mn.}$$

En finition :

$$66 \times \frac{3}{2} \simeq 100 \text{ tr/mn.}$$

*Perçage.* Acier doux :

$$d = 16 \text{ mm.}$$

Grande avance : 0,32.

$$n_1 = 100 \times \frac{120}{16} = 1\,000 \times \frac{3}{4} = 750 \text{ tr/mn.}$$

Petite avance : 0,08.

$$n_1 = \frac{750 \times 3}{2} = 1\,125 \text{ tr/mn.}$$

## B. — Le mouvement de coupe est une translation alternative : rabotage

Si on admet la formule

$$V = 2\,cn,$$

il est intéressant de connaître le nombre de coups par minute : $n$.

Pour un même travail, V est constante.

Supposons $c = c_1$. On a :

$$V = 2\,c_1 \cdot n_1.$$

Supposons $c = c_2$.

$$V = 2\,c_2 \cdot n_2.$$

En égalant les valeurs de V, on a :

$$c_1 \cdot n_1 = c_2 \cdot n_2, \text{ et } \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Les courses sont inversement proportionnelles au nombre de coups par minute.

On a donc :

$$n_1 = n_2 \frac{c_2}{c_1}.$$

## 1° Applications.

Pour un outil de chariotage en A. R. S. travaillant à sec en ébauche :

— *Acier doux.*

$$V = 24 \times \frac{2}{3} = 16 \text{ m/mn.}$$

$$\text{Si } c_2 = 100 \text{ mm, } n_2 = 80 \text{ c/mn.}$$

— *Acier demi-dur.*

$$V = 20 \times \frac{2}{3} = 13{,}2 \text{ m/mn.}$$

$$\text{Si } c_2 = 100 \text{ mm, } n_2 \simeq 65 \text{ c/mn.}$$

— *Acier dur.*

$$V = 16 \times \frac{2}{3} \simeq 10 \text{ m/mn.}$$

$$\text{Si } c_2 = 100 \text{ mm, } n_2 \simeq 50 \text{ c/mn.}$$

Retenons les chiffres pour chariotage en ébauche à sec, avec outil en A. R. S

| | | |
|---|---|---|
| *Acier doux* | : $c_2 = 100$, | $n_2 = 80$. |
| *Acier demi-dur* | : $c_2 = 100$, | $n_2 = 65$. |
| *Acier dur* | : $c_2 = 100$, | $n_2 = 50$. |

## 2° Calculs pratiques.

Chariotage à sec en ébauche, *acier dur.*

$$\text{Course } c_1 = 200.$$

$$n_1 = 50 \times \frac{100}{200} = 25 \text{ c/mn.}$$

Chariotage à sec en ébauche, *acier demi-dur.*

$$\text{Course } c_1 = 80.$$

$$n_1 = 65 \times \frac{100}{80} \simeq 80 \text{ c/mn.}$$

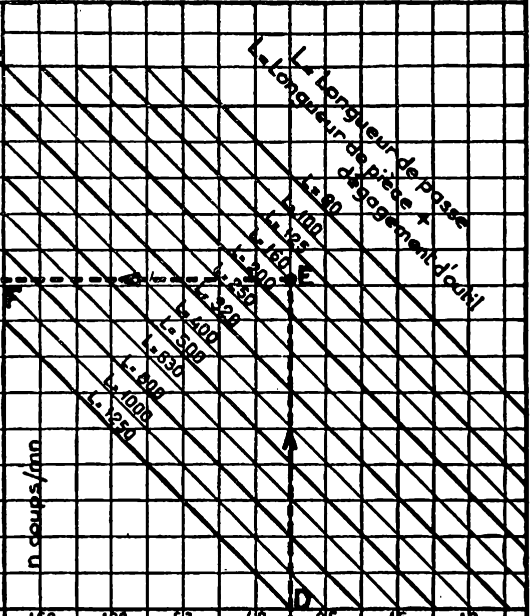
En finition :

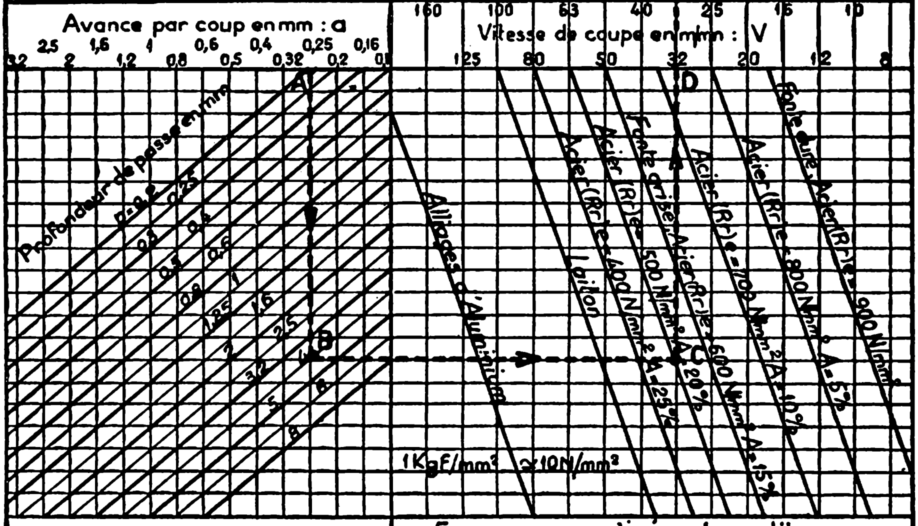
$$80 \times \frac{3}{2} = 120 \text{ c/mn.}$$

# Abaque des vitesses de coupe Durée de l'outil 1 heure
## MORTAISAGE, RABOTAGE

Abaque établi pour des outils en acier rapide supérieur ARS à 18% de W. Pour des outils en acier rapide à 10% de Cobalt et 20% de W: ARES il faut augmenter n lu de 1 division. Pour du travail à sec diminuer n lu de 2 divisions

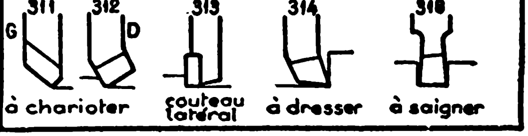
| Avec lubrification | | | à sec |
|---|---|---|---|
| Outil 318 | Outil 313-14 | Outil 311 et 12 | Outil 311 et 12 |
| 160 | 250 | 320 | 200 |
| 125 | 200 | 250 | 160 |
| 100 | 160 | 200 | 125 |
| 80 | 125 | 160 | 100 |
| 63 | 100 | 125 | 80 |
| 50 | 80 | 100 | 63 |
| 40 | 63 | 80 | 50 |
| 32 | 50 | 63 | 40 |
| 25 | 40 | 50 | 32 |
| 20 | 32 | 40 | 25 |
| 16 | 25 | 32 | 20 |
| 10 | 20 | 25 | 16 |
| 8 | 16 | 20 | 10 |
| 6 | 10 | 16 | 8 |
| 3 | 6 | 10 | 6 |



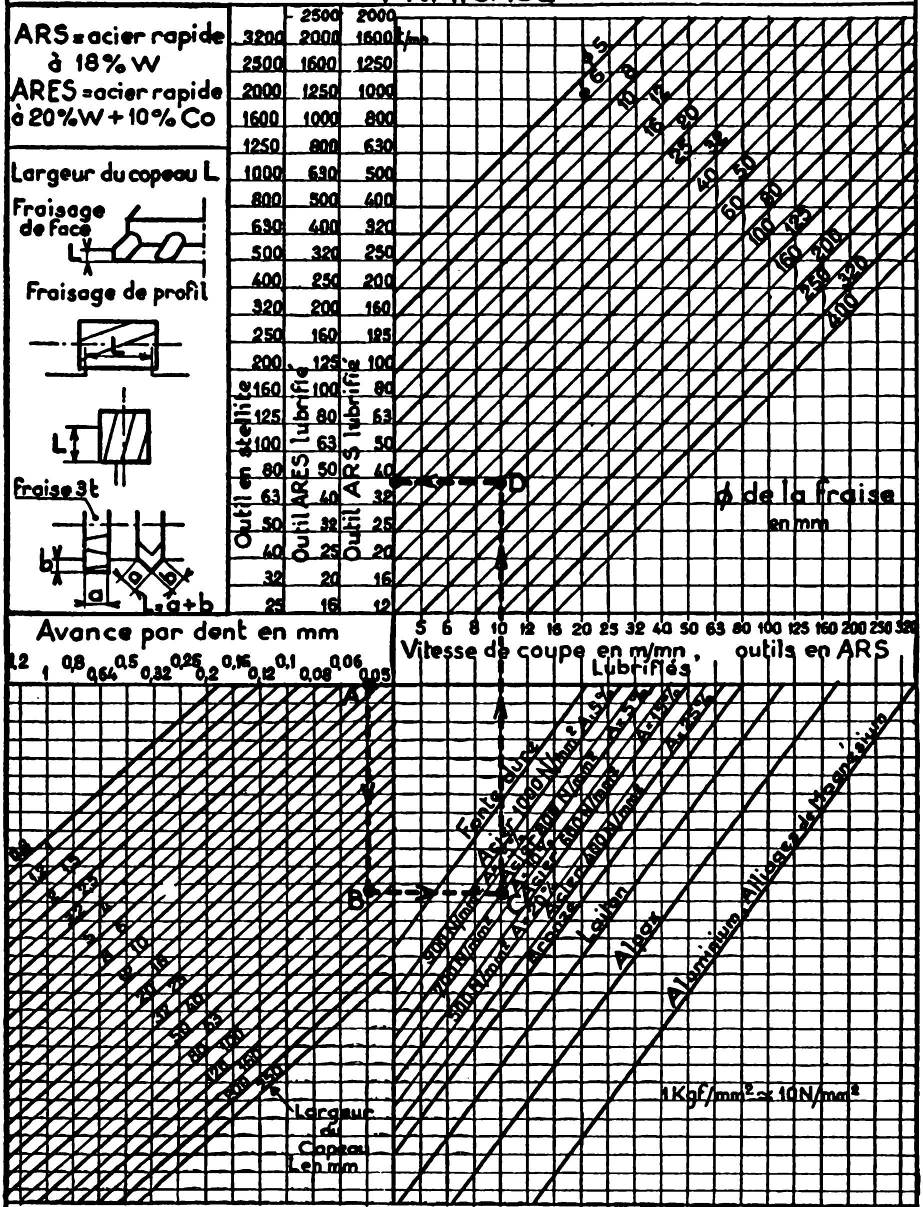




Exemple : Conditions de coupe a = 0,25 p = 4, Acier (Rr)e = 500 N/mm², Longueur de passe 160, Outil ARS - 311 lubrifié
Trajet A.B.C.D.E.F n = 100 coups/mn.
Pour un outil ARES lubrifié N° 311
n = 100 + 1 division = 125 coups/mn

Formes normalisées des outils

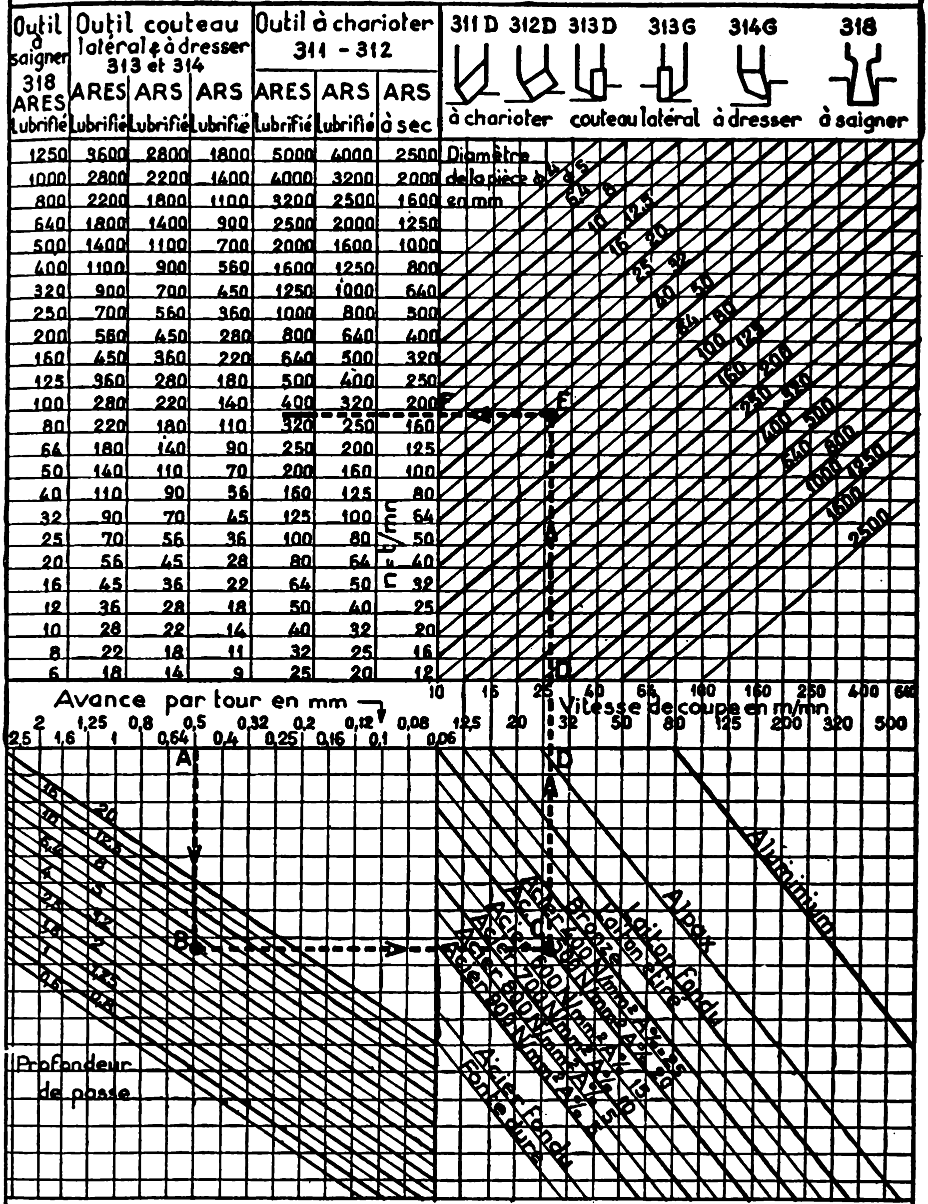


# Abaque des vitesses de moindre usure pour travail lubrifié
## FRAISAGE




Exemple : Outil en ARS - Lubrifié - Métal : Acier 800 N/mm² A% = 5
Conditions de coupe a = 0,05 L = 63 ϕ Fraise 80 mm
D'où tracé A-B-C-D —> Nombre de t/mn = 40 t/mn

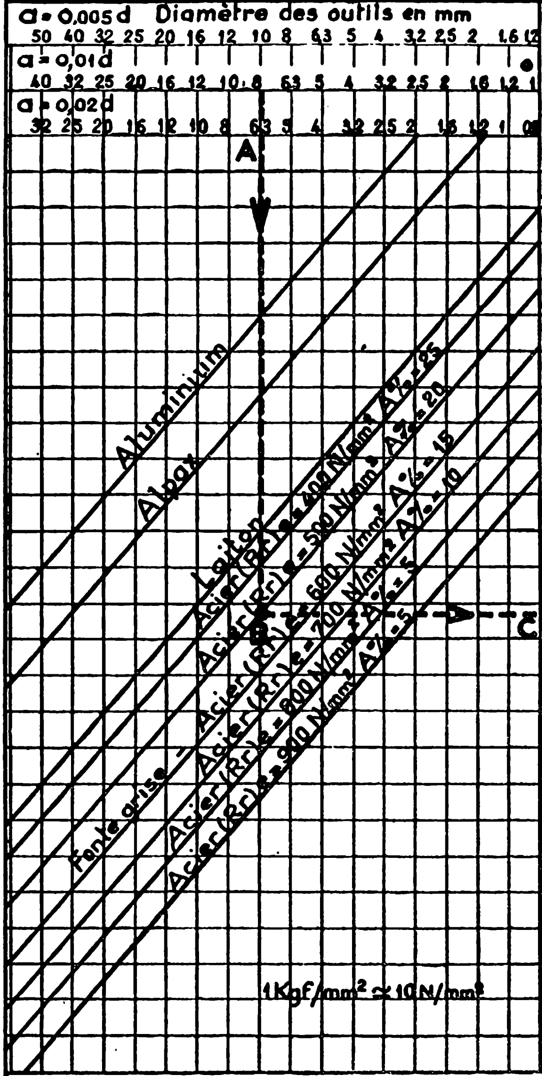
# Abaque des vitesses de coupe Durée de l'outil 1 heure
## TOURNAGE




| Outil à saigner 318 ARES Lubrifié | Outil couteau latéral & à dresser 313 et 314 ARES Lubrifié | ARS Lubrifié | ARS Lubrifié | Outil à charioter 311 - 312 ARES Lubrifié | ARS Lubrifié | ARS à sec |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1250 | 3600 | 2800 | 1800 | 5000 | 4000 | 2500 |
| 1000 | 2800 | 2200 | 1400 | 4000 | 3200 | 2000 |
| 800 | 2200 | 1800 | 1100 | 3200 | 2500 | 1600 |
| 640 | 1800 | 1400 | 900 | 2500 | 2000 | 1250 |
| 500 | 1400 | 1100 | 700 | 2000 | 1600 | 1000 |
| 400 | 1100 | 900 | 560 | 1600 | 1250 | 800 |
| 320 | 900 | 700 | 450 | 1250 | 1000 | 640 |
| 250 | 700 | 560 | 360 | 1000 | 800 | 500 |
| 200 | 560 | 450 | 280 | 800 | 640 | 400 |
| 160 | 450 | 360 | 220 | 640 | 500 | 320 |
| 125 | 360 | 280 | 180 | 500 | 400 | 250 |
| 100 | 280 | 220 | 140 | 400 | 320 | 200 |
| 80 | 220 | 180 | 110 | 320 | 250 | 160 |
| 64 | 180 | 140 | 90 | 250 | 200 | 125 |
| 50 | 140 | 110 | 70 | 200 | 160 | 100 |
| 40 | 110 | 90 | 56 | 160 | 125 | 80 |
| 32 | 90 | 70 | 45 | 125 | 100 | 64 |
| 25 | 70 | 56 | 36 | 100 | 80 | 50 |
| 20 | 56 | 45 | 28 | 80 | 64 | 40 |
| 16 | 45 | 36 | 22 | 64 | 50 | 32 |
| 12 | 36 | 28 | 18 | 50 | 40 | 25 |
| 10 | 28 | 22 | 14 | 40 | 32 | 20 |
| 8 | 22 | 18 | 11 | 32 | 25 | 16 |
| 6 | 18 | 14 | 9 | 25 | 20 | 12 |

Exemple : Outil ARES 311 Lubrifié - Métal Acier 500 N/mm² A% = 15
Conditions de coupe : a = 0,5 p = 6,4 ϕ pièce 45 mm
D'où tracé : A-B-C-D-E-F → nombre de t/mn = 380 (1 Kgf/mm² ≃ 10 N/mm²).

# Abaque des vitesses de coupe Durée de l'outil 1 heure
## PERÇAGE, ALÉSAGE, TARAUDAGE




| PERÇAGE outil en ARS L < 4d à sec | PERÇAGE outil en ARS L < 4d lubrifié | PERÇAGE outil en ARS L>4d lubrifié | PERÇAGE avec avant trou lubrifié | Alésage lubrifié ARS! | Alésage lubrifié ARS! | Taraudage |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Vitesse en tours/mn | | | | | | |
| 12500 | 20000 | 16000 | | | | |
| 10000 | 16000 | 12500 | | | | |
| 8000 | 12500 | 12000 | | | | |
| 6300 | 10000 | 8000 | | | | |
| 5000 | 8000 | 6300 | | | | |
| 4000 | 6300 | 5000 | | | | |
| 3200 | 5000 | 4000 | | | | |
| 2500 | 4000 | 3200 | 5000 | 2000 | 800 | 400 |
| 2000 | 3200 | 2500 | 4000 | 1600 | 630 | 320 |
| 1600 | 2500 | 2000 | 3200 | 1250 | 500 | 250 |
| 1250 | 2000 | 1600 | 2500 | 1000 | 400 | 200 |
| 1000 | 1600 | 1250 | 2000 | 800 | 320 | 160 |
| 800 | 1250 | 1000 | 1600 | 630 | 250 | 125 |
| 630 | 1000 | 800 | 1250 | 500 | 200 | 100 |
| 500 | 800 | 630 | 1000 | 400 | 160 | 80 |
| 400 | 630 | 500 | 800 | 320 | 125 | 63 |
| 320 | 500 | 400 | 630 | 250 | 100 | 50 |
| 250 | 400 | 320 | 500 | 200 | 80 | 40 |
| 200 | 320 | 250 | 400 | 160 | 63 | 32 |
| 160 | 250 | 200 | 320 | 125 | 50 | 25 |
| 125 | 200 | 160 | 250 | 100 | 40 | 20 |
| 100 | 160 | 125 | 200 | 80 | 32 | 16 |
| 80 | 125 | 100 | 160 | 60 | 25 | 12 |
| 60 | 100 | 80 | 125 | 50 | 20 | 10 |
| 50 | 80 | 60 | 100 | 32 | 16 | 8 |

Cet abaque est établi pour des outils en acier rapide supérieur ARS à 18% de W. Pour des outils en acier rapide extra-supérieur à 20% de W et 10% de Co (ARES) augmenter n de 1 division. Pour des outils en acier rapide ordinaire à 14% W (ARO) diminuer n de 1 division.

Exemple : Perçage, foret ARS d = 8 a = 0,01 d = 0,08 mm - lubrification abondante - Acier à 500 N/mm², Tracé ABC n = 1400 t/mn

# Principales machines-outils
# Leur travail

Les principales machines-outils utilisées en construction mécanique comprennent :

## A. — Les machines à outil de coupe

### 1° Machines dont le mouvement de coupe est rectiligne.

a) ***Machines utilisant un outil à tranchant unique.***

*a*) L'outil est animé du mouvement de coupe et la pièce du mouvement d'avance :

**Étaux-limeurs.**

**Mortaiseuses.**

*b*) La pièce est animée du mouvement de coupe et l'outil du mouvement d'avance :

**Raboteuses.**

b) ***Machines utilisant un outil à tranchants multiples.***

**Machines à brocher.**

### 2° Machines dont le mouvement de coupe est circulaire.

a) ***Machines utilisant un outil à tranchant unique.***

*a*) La pièce est animée du mouvement de coupe et l'outil du mouvement d'avance :

**Tours.**

*b*) L'outil est animé à la fois du mouvement de coupe et du mouvement d'avance :

**Machines à aléser.**

**b)** ***Machines utilisant un outil à tranchants multiples.***

*a*) L'outil est animé à la fois du mouvement de coupe et du mouvement d'avance :

**Machines à percer.**

*b*) L'outil est animé du mouvement de coupe et la pièce du mouvement d'avance :

**Machines à fraiser.**

## B. — Les machines à outil abrasif

### 1° Machines à rectifier.

**a)** ***Machines à rectifier les surfaces de révolution.***

**b)** ***Machines à rectifier les surfaces planes.***

### 2° Machines à meuler et à affûter.

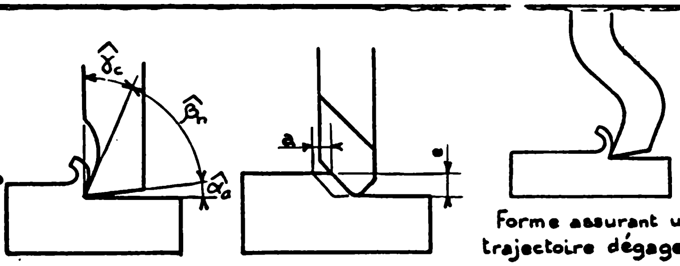
### 3° Machines à roder.

Les planches qui suivent donnent, sur les différentes machines-outils, des renseignements se rapportant :

- — aux outils employés,
- — aux surfaces usinées,
- — à la forme des machines.

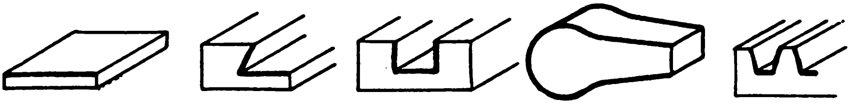
# Outil

$\widehat{\alpha_a}$ : dépouille
$\widehat{\gamma_c}$ : de coupe
$\widehat{\beta_n}$ : taillant
a : avance/coup
e : profondeur de passe




Forme assurant une trajectoire dégageante

## Surfaces exécutées

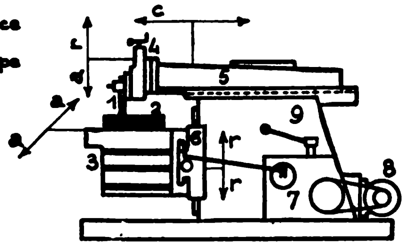


Travail d'enveloppe

Travail de forme

## Machines

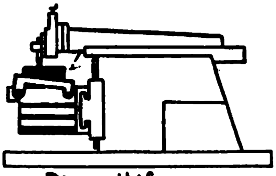
a : mouvement d'avance
c : mouvement de coupe
r : réglage



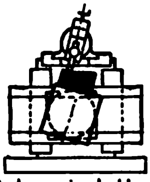

### Terminologie

1 Outil
2 Pièce
3 Table
4 Tête porte-outil
5 Coulisseau
6 Traverse
7 Boîte de vitesses
8 Moteur électrique
9 Bâti

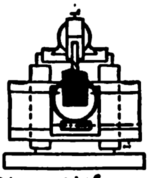
## Dispositifs d'amélioration



Dispositif pour rabotage oblique.



Cube orientable pour rabotage oblique



Dispositif pour rabotage circulaire

## Caractéristiques principales

1° Genre : à bielle intérieure - hydraulique, etc.
2° Course du coulisseau
3° Courses de la table : horizontale et verticale
4° Hauteur maximum sous outil
5° Vitesses du coulisseau
6° Puissance du moteur en Ch

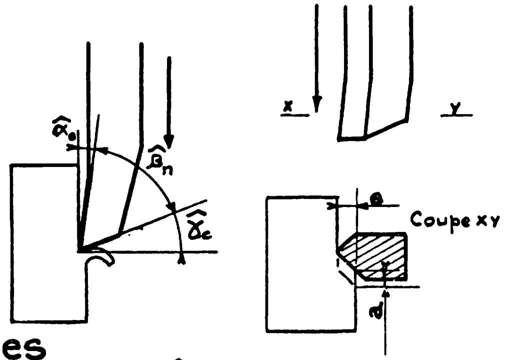
**Machines dont le mouvement de coupe est rectiligne et qui utilisent des outils à tranchant unique.**

**Machines à raboter : L'ÉTAU-LIMEUR**

# Outil

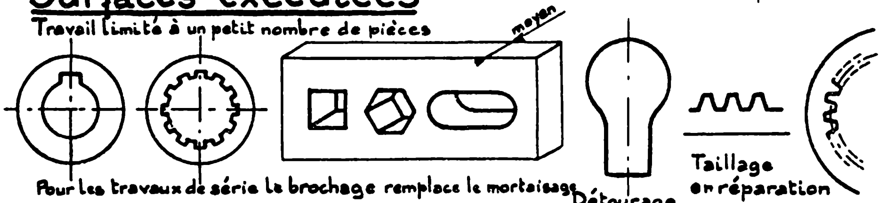
$\hat{\alpha}_o$ : dépouille
$\hat{\gamma}_c$ : de coupe
$\hat{\beta}_n$ : taillant

a : avance par coup
e : profondeur de passe




# Surfaces exécutées

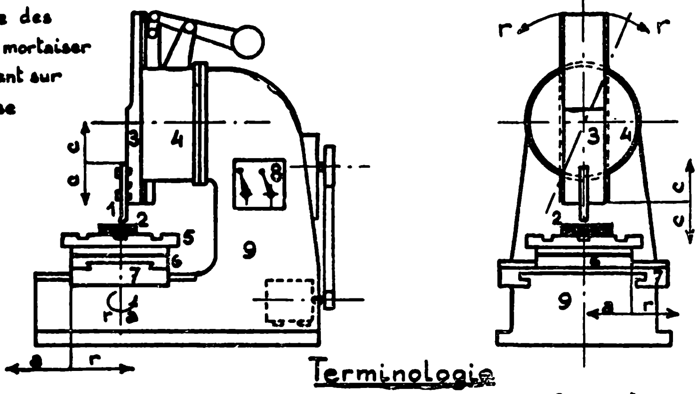
Travail limité à un petit nombre de pièces




Pour les travaux de série le brochage remplace le mortaisage

# Machine

Il existe des têtes à mortaiser se montant sur fraiseuse



## Terminologie

1 Outil
2 Pièce
3 Coulisseau porte-outils
4 Tête inclinable
5 Table circulaire
6 Coulisseau porte table
7 Glissière longitudinale
8 Boîte de vitesses
9 Bâti

## Caractéristiques principales

1° Genre : à Cde mécanique ou hydraulique
à tête fixe ou inclinable
2° Course du coulisseau porte-outils
3° Courses de la table.
4° Diamètre de la table
5° Hauteur maximum sous outil
6° Vitesses en coups par minute
7° Puissance du moteur en ch.

---

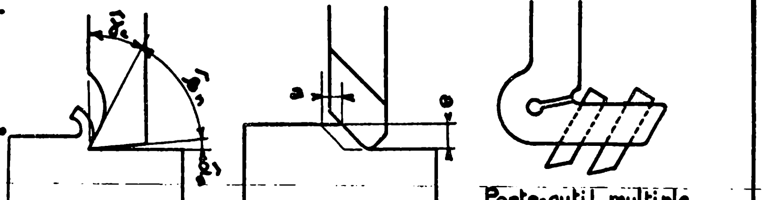
**Machines dont le mouvement de coupe est rectiligne et qui utilisent des outils à tranchant unique.**

**LA MACHINE A MORTAISER**

# Outil

$\hat{\alpha}_o$ : dépouille
$\hat{\beta}_o$ : de coupe
$\hat{\beta}_o$ : taillant

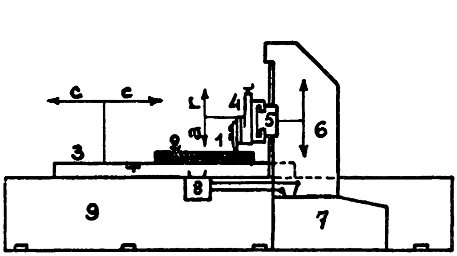
a : avance/coup
e : profondeur de passe

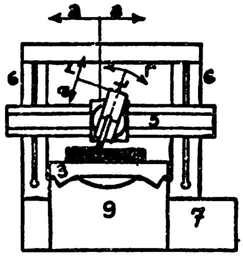



Porte-outil multiple

## Surfaces exécutées : les mêmes que pour l'étau limeur

## Machines

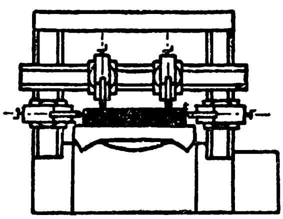


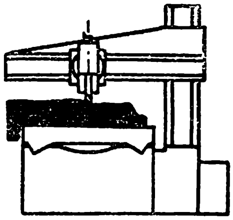

### Terminologie

1 Outil
2 Pièce
3 Table
4 Tête porte-outil
5 Traverse
6 Montants
7 Boîte de vitesse
8 Changement de marche
9 Banc

## Dispositifs d'amélioration



Pour augmenter le rendement



Pour travailler des pièces encombrantes

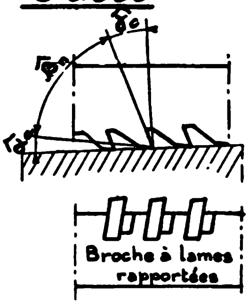
## Caractéristiques principales

1° Course de la table
2° Distance entre montants
3° Hauteur admise sous outils
4° Porte-outils : nombre - courses - avances automatiques
5° Commande : par boîte de vitesses ou moteur à V variable
6° Puissance du moteur en Ch. - Section du copeau dans acier à 50 kg/mm²

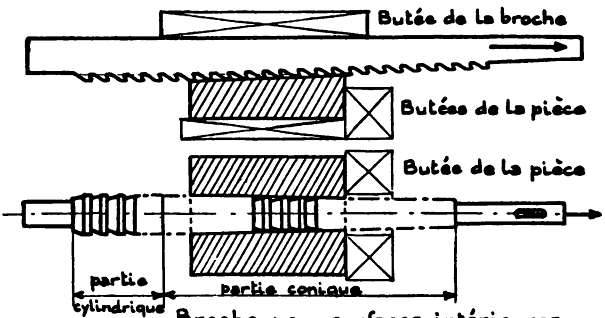
**Machines dont le mouvement de coupe est rectiligne et qui utilisent des outils à tranchant unique.**

**Machines à raboter : LA RABOTEUSE**

# Outil

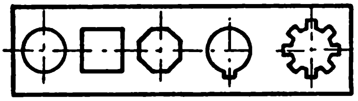



Broche pour surfaces extérieures

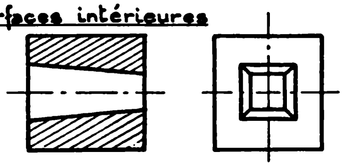


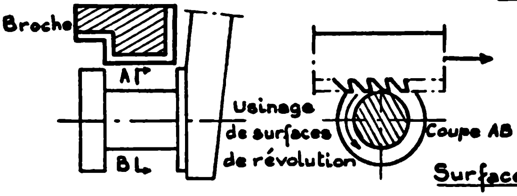

Broche pour surfaces intérieures

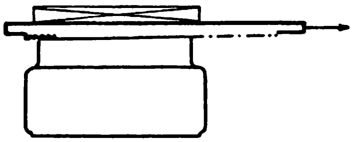
# Surfaces exécutées



Surfaces intérieures

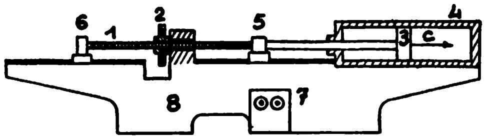




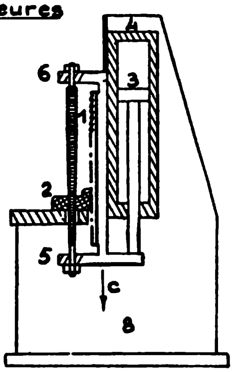



Surfaces extérieures

# Machines




Machine horizontale




Machine verticale à 2 broches

## Terminologie

1 Broche
2 Pièce
3 Piston
4 Cylindre
5 Attelage de la broche
6 Guide arrière de la broche
7 Réglage des vitesses
8 Bâti

# Caractéristiques

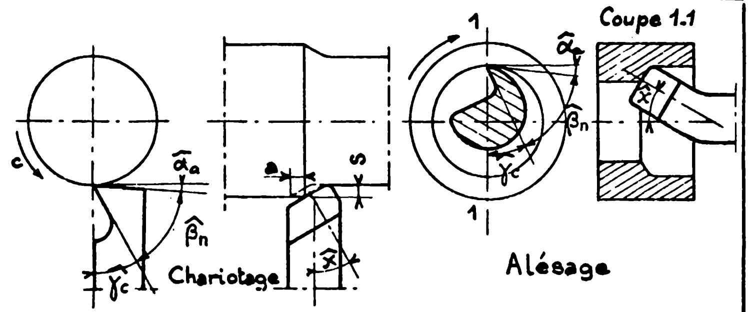
Machine verticale ou horizontale à c$^{de}$ hydraulique ou mécanique
Dimensions maxima de la broche
Course du piston
Dimensions maxima admises pour la pièce
Effort de tirage
Vitesses de travail et de retour
Puissance du moteur de C$^{de}$ du compresseur

**Machines dont le mouvement de coupe est rectiligne et à outil à plusieurs tranchants.**

**LES MACHINES A BROCHER**

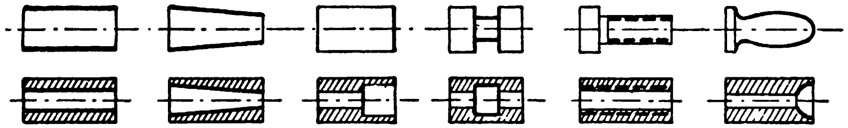
# Outil

a avance
s serrage
$\hat{x}$ direction
$\hat{\alpha}_a$ : dépouille
$\hat{\gamma}_c$ : de coupe
$\hat{\beta}_n$ : taillant




# Surfaces usinées

Surfaces extérieures



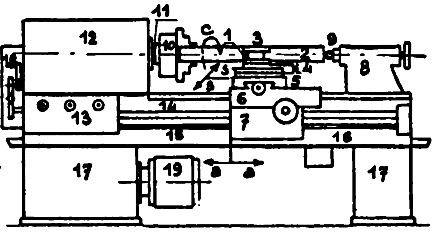
Surfaces intérieures

Travail d'enveloppe — Travail de forme

# Machines

## Terminologie

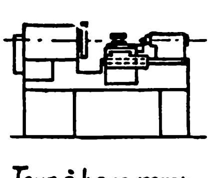
1 Outil
2 Pièce
3 Support porte-outil
4 Coulisseau porte-outil
5 Coulisseau transversal
6 Corps du chariot
7 Tablier
8 Contre poupée
9 Fourreau
10 Plateau à 3 mors
11 Broche
12 Poupée monopoulie
13 Boîte d'avance et de filetage
14 Vis mère
15 Barre de Chariotage
16 Banc
17 Pieds
18 Tête de Cheval
19 Moteur



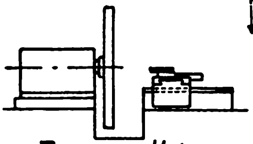
Tour parallèle à charioter et fileter

# Dispositifs d'amélioration

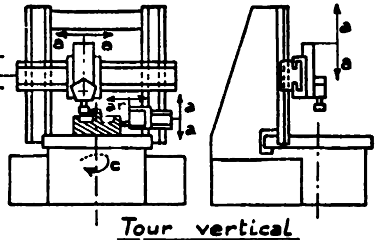
a) Pour l'usinage de pièces volumineuses



Tour à banc rompu



Tour en l'air

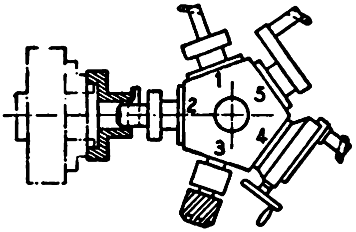


Tour vertical

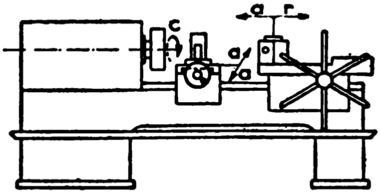
**Machines dont le mouvement de coupe est circulaire et à outil à tranchant unique.**

**LES TOURS**

## b) Pour augmenter le rendement



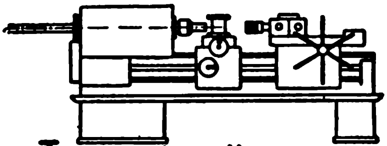

*Tourelles à plusieurs outils*



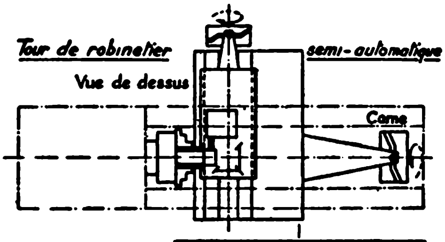

*Tour à tourelle révolver et à com^de manuelle*

## – Tours semi-automatiques

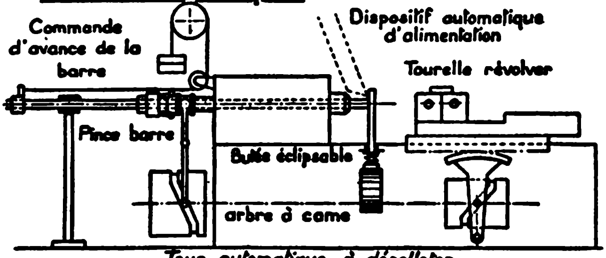
*Tour à tourelle revolver semi-automatique*



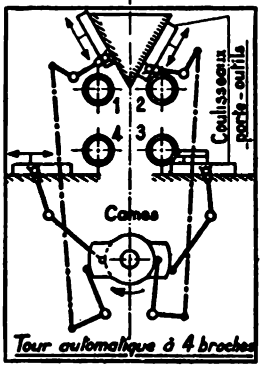

*Tour de robinetier semi-automatique*




## – Tours automatiques

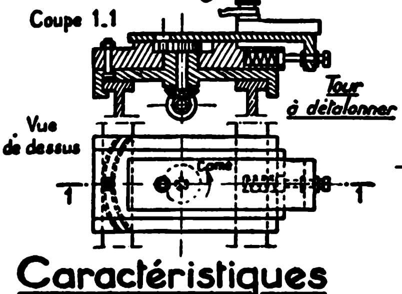



*Tour automatique à décolleter*



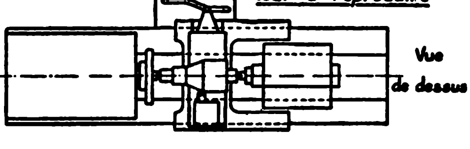

*Tour automatique à 4 broches*

## c) Pour l'usinage de surfaces particulières




*Tour à détalonner*

*Tour à reproduire*



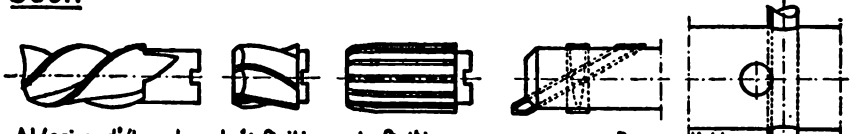

## Caractéristiques

Genre : Tour parallèle a charioter ....etc.
Commande à cône – monopoulie.
Hauteur de pointe H d P.
Distance entre pointes · L d P.
Vitesses.
Puissance et type du moteur électrique.
Dimensions accessoires : alésage broche, etc.

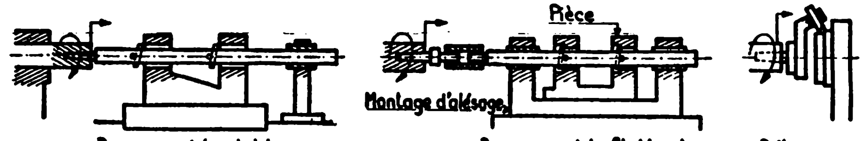
**Machines dont le mouvement de coupe est circulaire et à outil à tranchant unique.**

**LES TOURS**

# Outil

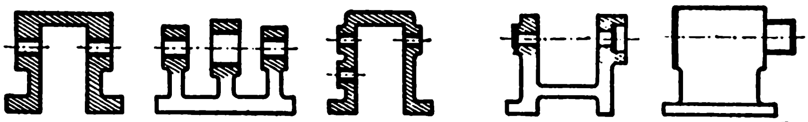


Alésoirs d'ébauche, de ½ finition, de finition — Barres d'alésage



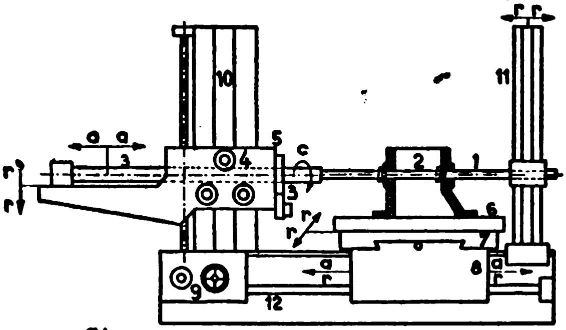

Barre montée rigide — Barre montée flottante — Détourage

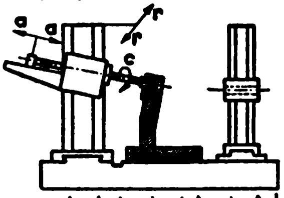
# Surfaces usinées



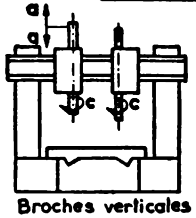
# Machines

1 Barre d'alésage
2 Pièce
3 Broche
4 Chariot porte broche
5 Plateau simple ou à surfacer
6 Table fixe ou orientable
7 Glissière transversale
8 Glissière longitudinale
9 Boîte des avances
10 Montant
11 Support de lunette
12 Banc

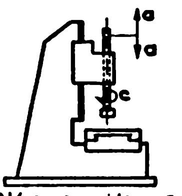


a montant de chariot orientable



Broches verticales multiples



Aléseuse rapide pour outils en carbure

# Caractéristiques

Genre : broche horizontale-montant fixe, etc
Diamètre de la broche
Course axiale de la broche
Course verticale du chariot porte broche

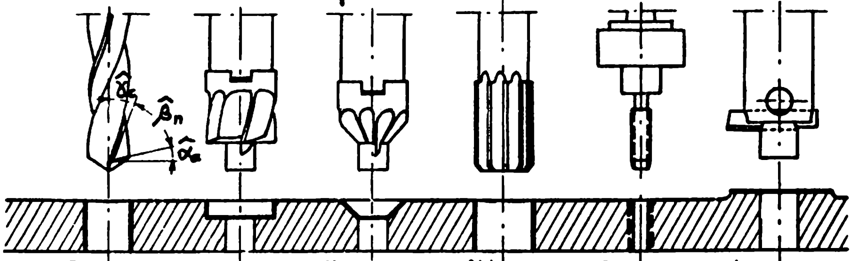
Distance du nez de la broche à la lunette
Dimensions de la table et courses des glissières
Vitesses de la broche
Puissance du moteur

---

Machines dont le mouvement de coupe est circulaire
et à outil à tranchant unique, animé des mouvements de coupe et d'avance.

**LES MACHINES A ALÉSER**

# Outils et surfaces usinées



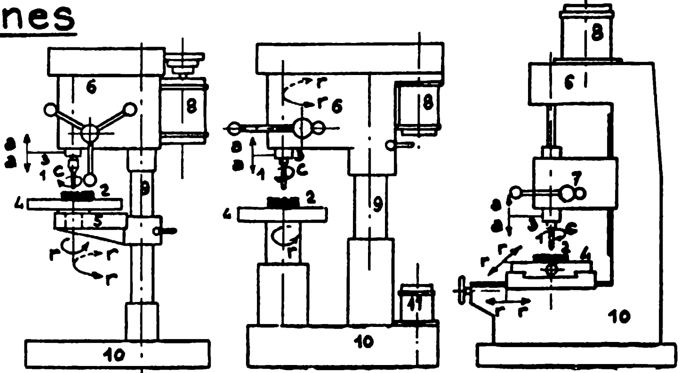
Perçage — Chambrage — Chambrage conique — Alésage — Taraudage — Lamage

*Ces opérations s'effectuent sur toutes les machines dont le mouvement de coupe est une rotation : Tours, Fraiseuses, Aléseuses.*

# Machines

## Terminologie

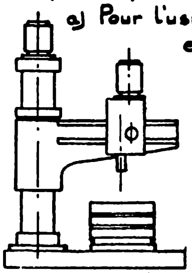
1 Outil
2 Pièce
3 Broche
4 Table
5 Console
6 Tête support de broche
7 Bras
8 Moteur
9 Colonne
10 Socle
11 Moto-pompe d'arrosage



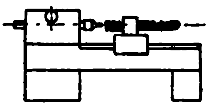
## Dispositifs d'amélioration

a) Pour l'usinage de pièces encombrantes

b) Pour augmenter le rendement

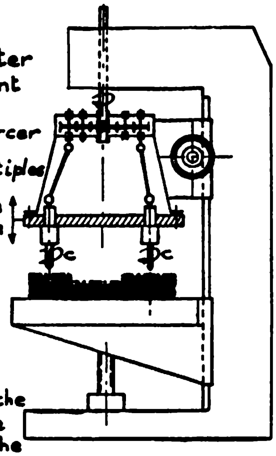


Machine radiale



Machine à centrer

Machine à Percer à broches multiples



# Caractéristiques

Genre : d'établi - sur socle - radiale - à broches multiples -
Descente : sensitive - automatique
Capacité : Φ max. du foret

Vitesses de la broche
Course de la broche
Hauteur sous broche
Puissance du moteur

---

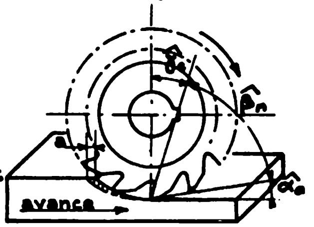
**Machines dont le mouvement de coupe est circulaire et à outil à plusieurs tranchants, animé des mouvements de coupe et d'avance.**

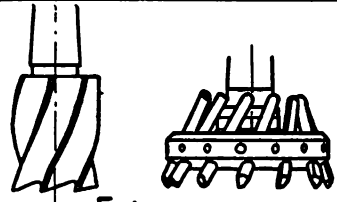
**LES MACHINES A PERCER**

# LES MACHINES A FRAISER

## Outil

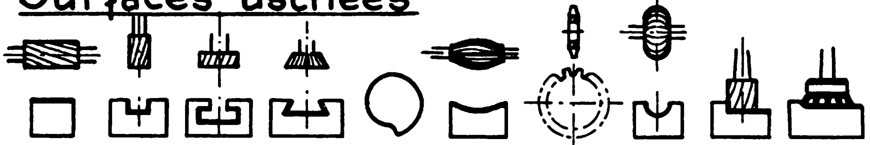
$\hat{\alpha}_n$: dépouille
$\hat{\gamma}_n$: de coupe
$\hat{\beta}_n$: taillant
a: avance par dent



Fraises
cylindrique 2 tailles - à outils rapportés

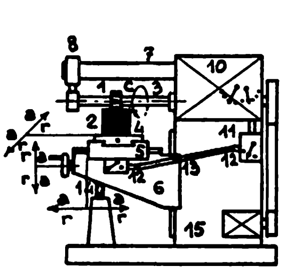
## Surfaces usinées



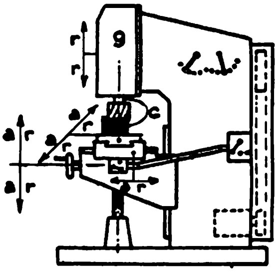
Fraisage de profil — de forme — de face

## Machines

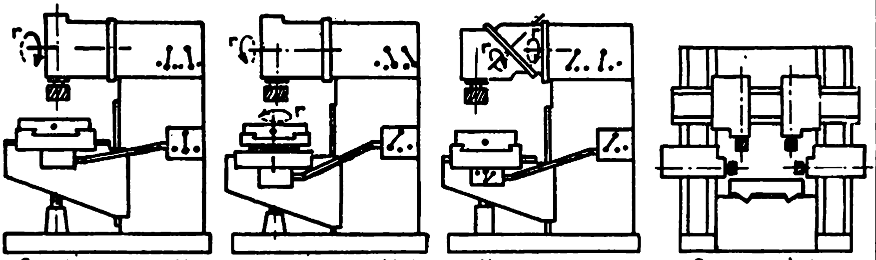
1 Outil-fraise
2 Pièce
3 Arbre porte fraise
4 Table
5 Chariot
6 Console
7 Bras support
8 Lunette support d'arbre
9 Tête
10 Boîte des vitesses
11 Boîte des avances
12 Cardans
13 Arbre télescopique
14 Vis support de console
15 Bâti



Horizontale



Verticale



Semi-universelle — Universelles à table orientable, à tête universelle — Genre raboteuse à têtes multiples

## Caractéristiques

Genre : verticale - horizontale universelle...
Numéro du cône morse de la broche
Course longitudinale de la table, auto. ou non
Course transversale de la table, auto. ou non
Course verticale de la table, auto. ou non
Dimensions de la table.
Vitesses de la broche
Puissance du moteur.

**Machines dont le mouvement de coupe est circulaire et à outil à plusieurs tranchants, animé du mouvement de coupe.**

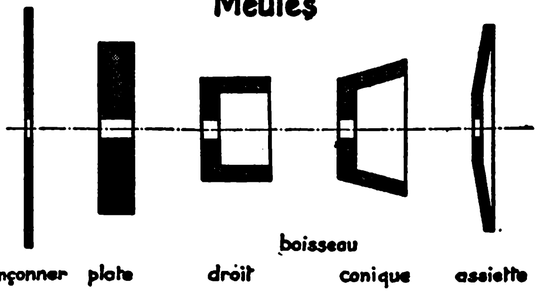
**LES MACHINES A FRAISER**

## Outils

**Meules**

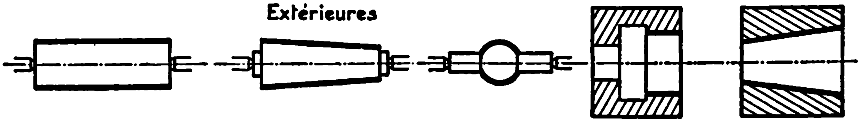
### Caractéristiques

- Abrasif
- Grosseur du grain
- Grade
- Structure
- Agglomérat

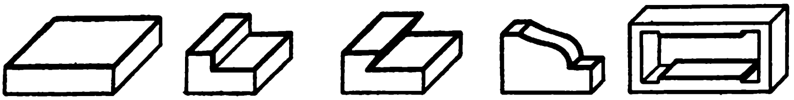



## Surfaces usinées

### *Surfaces de révolution*

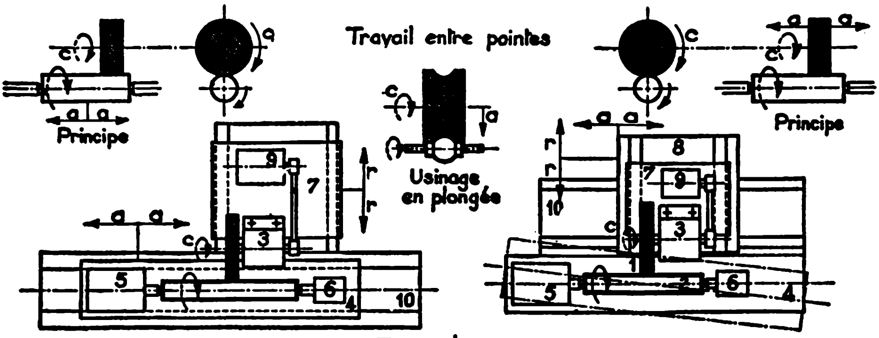



### *Surfaces planes*




## Machines

### *1. Pour surfaces de révolution extérieures*



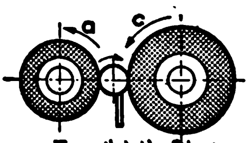

**Terminologie**

1 - Outil : meule
2 - Pièce
3 - Poupée fixe de commande de la meule
4 - Table orientable ou non
5 - Poupée fixe de commande de la pièce
6 - Poupée mobile
7 - Table porte-meule
8 - Chariot support de meule
9 - Moteur de commande de la meule
10 - Glissières du bâti orientables ou non

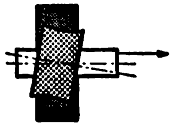
**Machines utilisant un outil meule.**

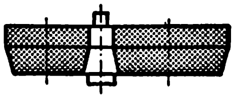
**LES MACHINES A RECTIFIER**

## Rectification sans pointes



Vue de gauche

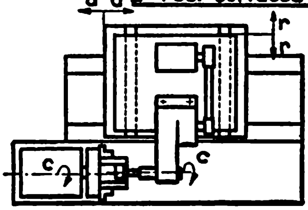


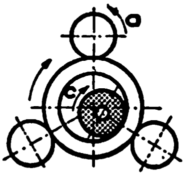


Travail à l'enfilade

Travail en plongée

## 2 Pour surfaces de révolution intérieures





Travail en l'air

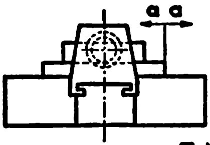
Travail sans pointes

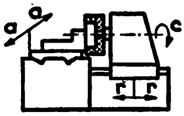
## 3 Pour surfaces planes

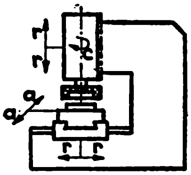
### Travail en bout par meule boisseau

Broche horizontale

Broche verticale







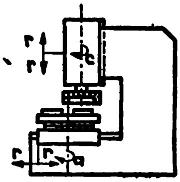
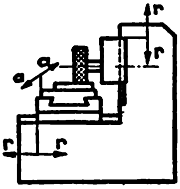
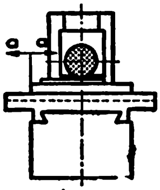


Table à mouvement rectiligne

Table à mouvement circulaire

### Travail tangentiel par meule plate





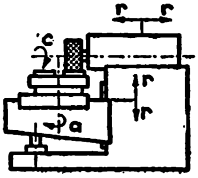


Table à mouvement rectiligne

Table à mouvement circulaire

## Caractéristiques :

Genre : cylindrique, plane, sans pointes
Dimensions des meules
Dimensions maxima des pièces admises

Inclinaison possible de la table
Vitesses de la meule et de la pièce
Vitesses d'avance

---

Machines utilisant un outil meule.

# LES MACHINES A RECTIFIER

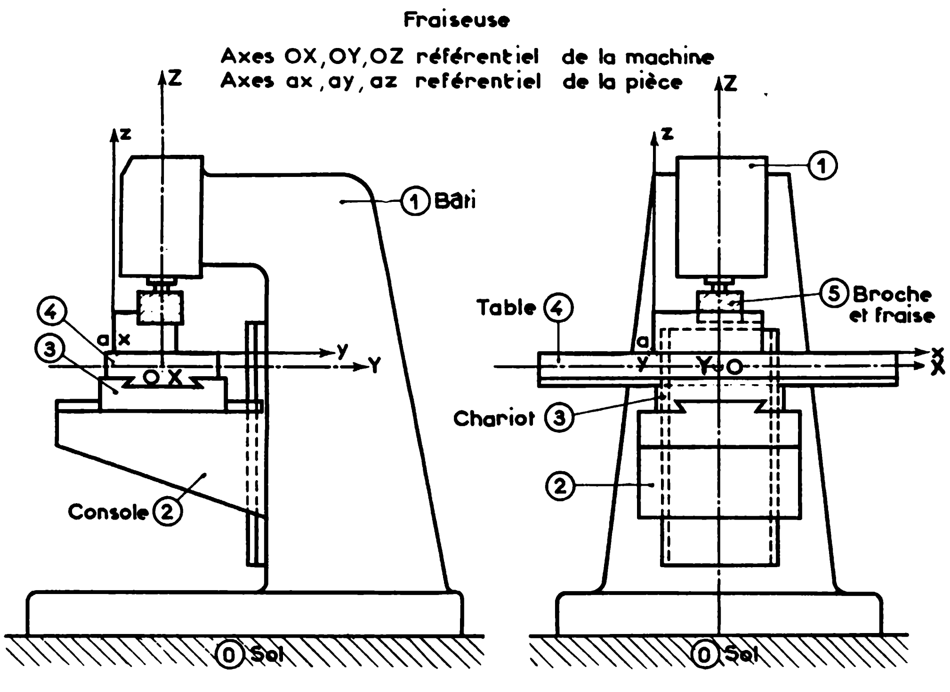

Fraiseuse
Axes OX, OY, OZ référentiel de la machine
Axes ax, ay, az référentiel de la pièce
Z
z
1 Bâti
4
3
a x
y
Y
O X
Console 2
0 Sol
Z
z
1
5 Broche et fraise
Table 4
a
y
Y O
x
X
Chariot 3
2
0 Sol

*Fig.* 1.

# Mise en position d'une pièce sur une machine-outil

L'homme a conçu les machines en se référant à des systèmes constitués par trois axes rectangulaires OX, OY, OZ qui ont été appelés **système de référence** ou **référentiel.**

Les différents déplacements des parties essentielles de la machine, translation des tables, rotation des outils ont été conçus en fonction de ces axes de réference : les glissières le plus souvent rectilignes, les paliers assurant la rotation des arbres porte-outil ou support de pièce ont des positions relatives qui dépendent du référentiel choisi. Leur précision conditionne les précisions maxima des pièces usinées.

## I — LES AXES DE RÉFÉRENCE D'UNE MACHINE-OUTIL : LA FRAISEUSE (*fig. 1*).

***Le bâti*** ① assure la liaison des différents éléments constituant la machine entre eux et avec le sol ⓪.

***La console*** ② assemblée au bâti par des glissières verticales peut prendre un mouvement de translation rectiligne vertical parallèle à l'axe OZ.

***Le chariot*** ③ assemblé à la console par des glissières horizontales peut avoir un mouvement de translation rectiligne horizontal parallèle à l'axe OY qui est perpendiculaire à OZ.

***La table*** ④ sur laquelle on installe la pièce est assemblée sur le chariot par des glissières horizontales et peut avoir un mouvement de translation rectiligne parallèle à l'axe OX qui est perpendiculaire aux axes OY et OZ, donc au plan OYZ.

***La broche*** sur laquelle est montée la fraise ⑤ (supposée cylindrique) a son axe vertical, donc normal au plan OXY.

***L'axe OZ*** sera choisi coïncidant avec l'axe de rotation de la fraise. Le point O se trouve à l'intersection de OZ avec le plan des glissières de la table ④. L'axe OX est parallèle à ces glissières et OY est perpendiculaire à ces glissières, donc parallèle aux glissières du chariot ③.

La table peut se déplacer horizontalement suivant OX ou suivant OY qui sont les directions de l'un ou de l'autre mouvement d'avance.

La fraise supposée cylindrique à 2 tailles peut tailler le métal avec la denture latérale et réaliser une face plane verticale qui comporte des ondulations de taillage. Elle peut aussi, avec la denture disposée en bout, réaliser une surface plane horizontale de meilleure qualité que la précédente. Ce mode d'usinage est réservé pour réaliser des cotes précises assorties d'exigences de planéité importantes.

## II — LES AXES DE RÉFÉRENCE D'UNE PIÈCE A USINER.

### *Description de la pièce.*

Soit une pièce (*fig. 2*) dans laquelle on doit fraiser une entaille. Il s'agit d'une opération d'usinage à faire sur une pièce parallélipipédique déjà fraisée aux cotes $200^{\pm 0,1}$, $45^{\pm 0,1}$, $80^{\pm 01}$, les exigences de planéité et de perpendicularité étant respectées.

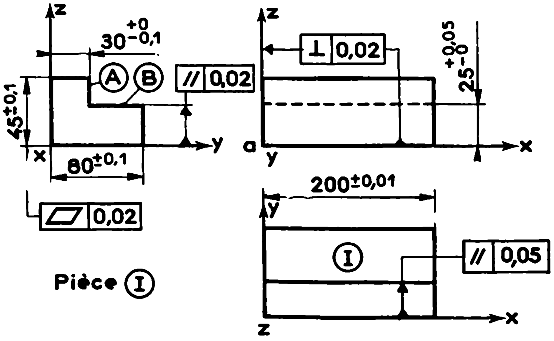



*Fig.* 2.

L'entaille exige l'usinage de deux surfaces planes définies par les cotes $30^{+0}_{-0,1}$ avec l'exigence de parallélisme de 0,05 et $25^{+0,05}_{0}$ avec exigence de parallélisme de 0,02. Ces surfaces qui sont perpendiculaires peuvent être réalisées en finition par une fraise cylindrique : la cote à obtenir avec le plus de précision, $25^{+0,05}_{+0}$, sera usinée par fraisage de face (par la denture disposée au bout de la fraise). L'autre cote, $30^{+0}_{-0,1}$, sera réalisée par fraisage de profil (dentures disposées sur la partie cylindrique). Le référentiel de la pièce comportera des axes $\vec{ax}$, $\vec{ay}$, $\vec{az}$, choisis de façon que les plans qui les contiennent deux à deux puissent servir de départ à la cotation définissant les surfaces à usiner.

Comme les techniciens concepteurs des pièces utilisent des axes de référentiels perpendiculaires, le trièdre $\vec{ax}$, $\vec{ay}$, $\vec{az}$ est orthogonal, mais il pourrait en être autrement.

Comme les surfaces à usiner A et B doivent être exécutées par une fraise cylindrique deux tailles, on disposera la pièce sur la fraiseuse de façon que le référentiel de la pièce soit parallèle au référentiel de la machine $\overrightarrow{OX} /\!/ \vec{ax}$, $\overrightarrow{OY} /\!/ \vec{ay}$, $\overrightarrow{OZ} /\!/ \vec{az}$ dans le cas présent.

***L'installation de la pièce sur la table de la machine*** sera faite à partir du « référentiel machine » en utilisant les déplacements de la table et des chariots de la fraiseuse.

Quelle que soit la machine utilisée et l'usinage réalisé, on adoptera cette méthode, qu'il s'agisse d'un tour, d'une raboteuse, d'une presse, d'une cisaille, d'une machine à coudre..., etc.

## III — MISE EN POSITION DES PIÈCES POUR TRAVAUX RÉPÉTITIFS.

Il est très fréquent de réaliser de nombreux objets en moyenne ou grande série.

A un même poste de travail se succèdent des pièces qui sont dans le même état d'avancement de l'usinage :

— ***à l'état brut*** (pièces produites dans les mêmes conditions : fonderie, forge, laminée et sciée, etc.);

— ***après avoir subi une ou plusieurs opérations d'usinage.***

Il importe que le référentiel de la pièce se situe pour toutes les pièces dans la même position par rapport au référentiel de la machine.

Nous allons établir que six surfaces de contact constituées par de petites surfaces (assimilables à des points pour l'étude théorique), judicieusement disposées, permettent aux différentes pièces d'occuper la même position par rapport au référentiel de la machine-outil. Ainsi l'outil réalisera correctement les surfaces à usiner aux cotes prévues (*fig. 3*). Sur cette figure, il est prévu la mise en position de la pièce afin que la fraise cylindrique 3 tailles réalise les cotes $10^{+0,05}_{-0}$ et $15^{+0,1}$. On suppose que les faces A et B ont été primitivement usinées.

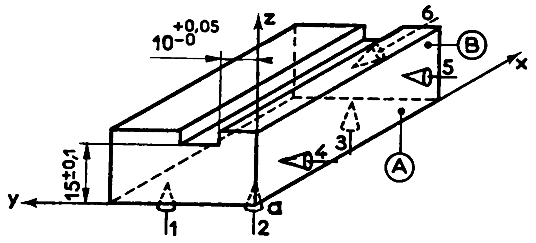


*Fig.* 3.

Pour que les pièces occupent la même position, il faut que le système de blocage provoque sur chaque surface de contact des forces de contact normales à la surface.

On remarquera qu'il y a :

— trois contacts 1-2-3 sur la surface A (la plus importante en principe); elle est celle qui doit être disposée parallèlement à la table pour situer la cote 15;

— deux contacts 4 et 5 sur la face B pour situer la note 12;

— un contact 6 en bout.

Nous justifierons par la suite le choix de la position des surfaces de contact.

## IV — DEGRÉS DE LIBERTÉ.

**Notions de cinématique indispensables :**

1° ***Le mouvement d'un corps considéré comme un système invariable est défini lorsqu'on connaît celui de trois points matériels non en ligne droite.***

Pour établir la coïncidence d'un corps mobile avec une position prévue pour lui, il suffit de placer trois de ses points non en ligne droite sur leurs homologues : $A_1$ sur $A_2$, $B_1$ sur $B_2$, $C_1$ sur $C_2$ (*fig. 4*).

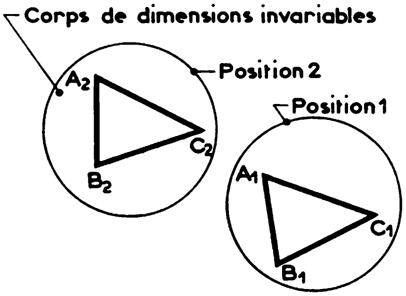



*Fig.* 4.

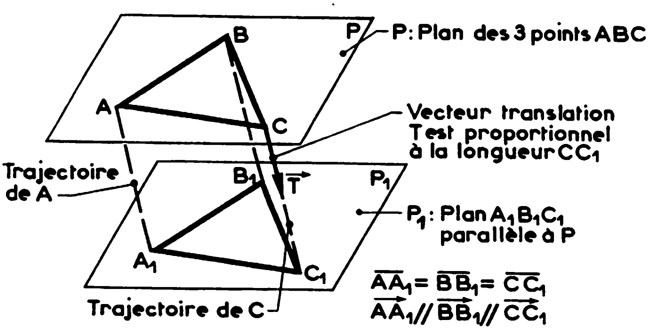



*Fig.* 5.

2° ***Mouvement de translation.***

*a*) Un corps de dimensions invariables est animé d'un mouvement de translation lorsque, pour passer d'une position à une autre, tous ses points décrivent des trajectoires parallèles à la même vitesse : elles sont donc égales à chaque instant.

Si les trajectoires sont des droites, la translation est rectiligne.

La *figure 5* représente la translation rectiligne d'un solide défini par trois points A, B, C, qui décrivent, pendant un temps *t*, des trajectoires parallèles $\overline{AA_1}$ $\overline{BB_1}$ $\overline{CC_1}$ égales à $V \times t$ (*V* étant la vitesse de la translation). Les plans contenant A, B, C et $A_1$, $B_1$, $C_1$ sont parallèles.

On représente une translation par un vecteur $\vec{T}$ parallèle à la direction rectiligne du déplacement dont la mesure $T$ est proportionnelle à la vitesse de déplacement $\overline{V}$ ou à la distance parcourue $\overline{V} \times t = \overline{AA_1} = \overline{BB_1} = \overline{CC_1}$.

*b) Composition des translations : figure 6.*

Un corps défini par 3 points A, B, C est animé d'une translation rectiligne $\vec{T}$ et occupe la position $A_1$, $B_1$, $C_1$ au bout du temps $t$. Le déplacement du corps est défini par rapport au référentiel $\overrightarrow{A_x}$, $\overrightarrow{A_y}$, $\overrightarrow{A_z}$. On démontre que la translation $\vec{T}$ est équivalente à la somme vectorielle $\overrightarrow{T_x}$, $\overrightarrow{T_y}$, $\overrightarrow{T_z}$.

La position $A_1$, $B_1$, $C_1$ du corps peut être obtenue en faisant décrire au corps A, B, C successivement les translations $\overrightarrow{T_x}$, $\overrightarrow{T_y}$ et $\overrightarrow{T_z}$ dans un ordre quelconque.

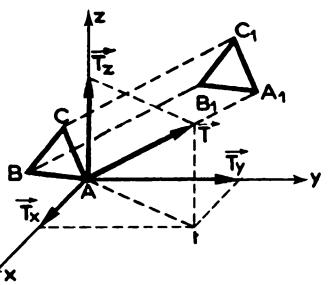



*Fig.* 6.

## 3° *Rotation.*

*a)* Si un corps a deux points fixes, le **seul** mouvement qu'il puisse prendre est un mouvement de rotation autour de la droite joignant les deux points, droite appelée **axe de rotation**. La trajectoire de chacun de ses points est une circonférence tracée dans un plan normal à l'axe. Au même instant, la vitesse angulaire de tous les points est constante (voir *fig.* 7).

On représente une rotation par un vecteur $\vec{R}$ qui exprime par son sens le sens de rotation et par sa longueur l'une des constantes soit la vitesse angulaire $\omega$, soit l'angle $\alpha$ parcouru pendant le temps $t$ : $\alpha = \omega t$ ($\alpha$ en radians, $\omega$ en rad/s et $t$ en s).

*b) Composition des rotations concourantes.*

Nous ne considérons, pour cette étude, que des mouvements de très faible amplitude ne durant qu'un très petit temps $\Delta t$, les seuls qui nous intéressent pour la mise en place des pièces et leur blocage sur la table des machines : ce sont des **rotations élémentaires.**

On démontre que la **rotation élémentaire** résultante de deux ou trois rotations **concourantes** élémentaires est une rotation élémentaire dont le vecteur est la résultante des vecteurs représentant les rotations composantes $\vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2$ ou $\vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2 + \vec{R}_3$ (voir *fig. 8*).

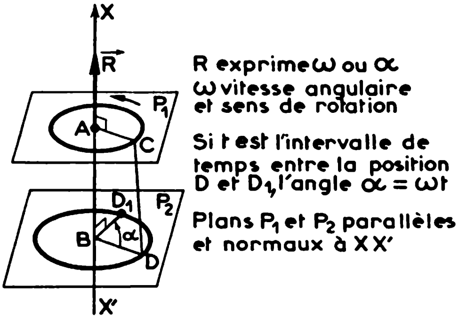



*Fig. 7.*

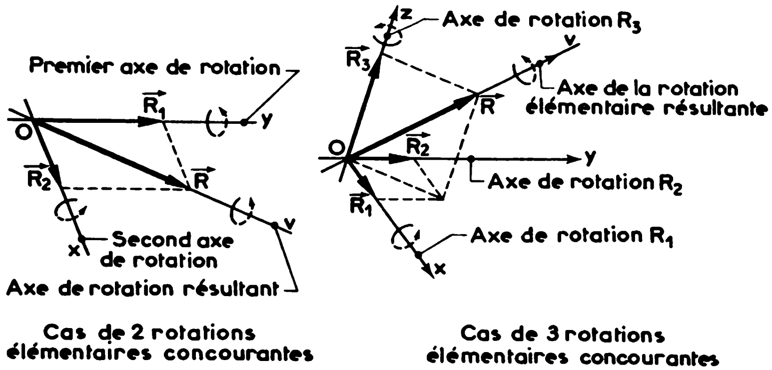



*Fig. 8.*

Il est possible d'admettre, puisqu'il s'agit de rotations élémentaires, que la rotation $\vec{R}$ peut donner naissance à :

— deux rotations concourantes suivant O$x$ et O$y$ (cas de 2 rotations), le point O étant sur $\vec{R}$ et les axes O$x$ et O$y$ quelconques, le plan O$xy$ contenant $\vec{R}$;

— trois rotations concourantes suivant O$x$, O$y$ et O$z$ (cas de 3 rotations), O étant sur $\vec{R}$ et les axes O$x$, O$y$, O$z$ quelconques, non situés obligatoirement dans un même plan. Les vecteurs rotations seront obtenus en application des relations vectorielles :

$$\vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2 \quad \text{ou} \quad \vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2 + \vec{R}_3 \quad (\textit{fig. 8}).$$

4° ***Déplacement d'une pièce.***

Lorsqu'une pièce occupe une position ① et qu'elle doit occuper une position **très voisine** ②, ce déplacement peut être considéré comme résultant de deux

mouvements élémentaires; une translation rectiligne $\vec{T}$ et une rotation $\vec{R}$ qui se produisent simultanément ou l'une après l'autre.

La *figure 9* est une représentation de l'espace, très agrandie, de ce mouvement élémentaire. Le corps est supposé matérialisé par trois points A, B, C en position ①. En position ②, il est en $A_1B_1C_1$.

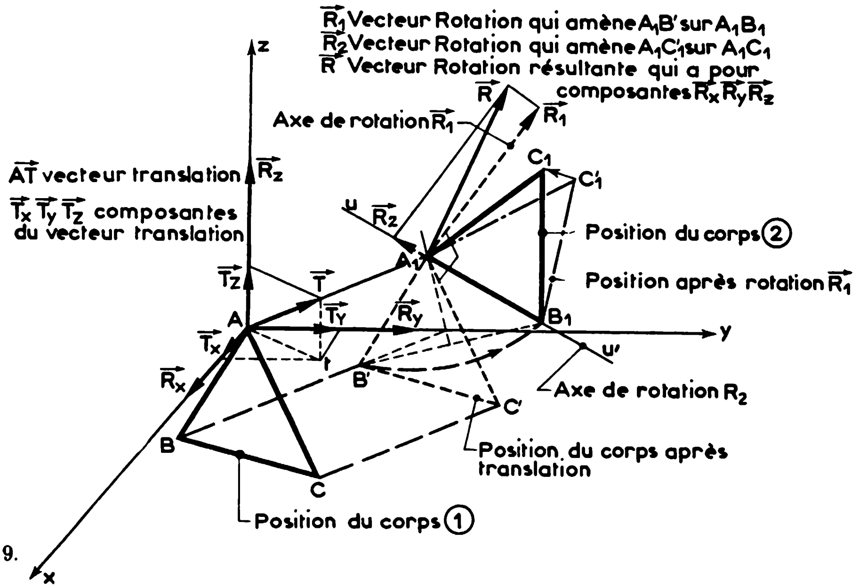



*Fig.* 9.

*a*) **Le premier déplacement** amène A en $A_1$ et le corps en $A_1B'C'$ : c'est une **translation rectiligne $\vec{T}$** de composantes $\vec{T_x}$, $\vec{T_y}$, $\vec{T_z}$.

*b*) **Second déplacement** : c'est une **rotation élémentaire**.

Une première rotation $\vec{R_1}$ conduit B' en $B_1$ : l'axe de rotation est perpendiculaire au plan $A_1B'B_1$ en $A_1$.

Une seconde rotation $\vec{R_2}$ conduit $C'_1$ en $C_1$ : l'axe de rotation est la droite $A_1B_1$.

La résultante $\vec{R} = \vec{R_1} + \vec{R_2}$ est la rotation qui fait coïncider $A_1B'C$ avec $A_1B_1C_1$ seconde position du corps. Elle admet pour composantes $\vec{R_x}$, $\vec{R_y}$, $\vec{R_z}$.

Ainsi tout **déplacement élémentaire d'une pièce sur son support** peut être considéré comme le résultat de :

- **trois translations élémentaires** $\vec{T_x}$, $\vec{T_y}$, $\vec{T_z}$ suivant les axes de références;
- **trois rotations élémentaires** $\vec{R_x}$, $\vec{R_y}$, $\vec{R_z}$ autour des axes de références.

Cés valeurs représentent des paramètres indépendants comparables à ceux que l'on met en évidence dans la théorie mathématique de position et que les mathématiciens appellent **degrés de liberté**.

Pour éviter qu'une pièce ne se déplace de la position qu'on lui a imposée il faut que le système de repérage s'oppose à tout déplacement élémentaire.

## V — LES LIAISONS DE LA PIÈCE AVEC SON SUPPORT.

1° ***Le repérage des pièces dit isostatique,*** dans le montage d'usinage ou sur la table de la machine, se fait au moyen de six points de contacts ou touches judicieusement disposées.

Chaque touche est définie par une petite surface qui entre en contact avec la pièce en un ou plusieurs points qui définissent le plan tangent commun à la pièce et à la touche du support.

La normale *n* à ce plan joue un rôle important car elle est la direction des actions de contact pièce/support.

De toute évidence, il est nécessaire d'exercer sur la pièce des efforts de bridage qui produisent des actions dirigées suivant les normales de contact (voir *fig. 10*).

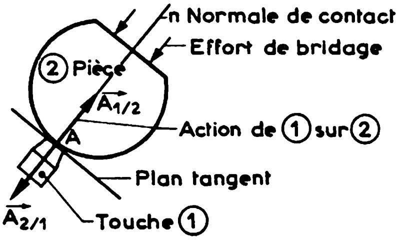



*Fig.* 10.

2° ***Disposition des touches ou points de contact.***

Nous avons vu qu'il faut six points de contact pour assurer la position isostatique d'une pièce, chacun de ses points ayant dans le montage ou sur la table une position bien précise par rapport au système de référence de la machine.

Examinons la *figure 11* sur laquelle est représentée une pièce parallélipipédique. La face supérieure doit être usinée parallèle à la face inférieure déjà dressée.

Bien entendu, on suppose que le bridage a été conçu pour que s'exerce, sur chaque touche de repérage, une action de contact.

O*x*, O*y*, O*z*, sont les axes de référence de la pièce.

*a*) **Rôle de chaque touche de repérage 1, 2, 3.**

- Les trois touches 1, 2, 3 qui assurent la liaison de la pièce avec la table ont leurs normales verticales, donc parallèles, concourantes à l'infini.

  Elles s'opposent à la translation de la pièce suivant O*z*.

- Les deux touches 1 et 2 s'opposent à la rotation de la pièce autour d'un axe parallèle à l'axe $Ox$.

  Pour augmenter leur efficacité, elles doivent être le plus éloignées possible.
- Les deux touches 1 et 3 ou 2 et 3 s'opposent à la rotation de la pièce autour de l'axe $Oy$ : les distances 1-3 ou 2-3 doivent être maximales.

  Si on supprime ou abaisse la touche 1, la rotation de la pièce autour de l'axe 3-2 est possible et par suite autour de $Oy$ et $Ox$. Un phénomène identique se produirait si on supprimait ou abaissait la touche 2.

  Si on supprime ou abaisse la touche 3, une rotation de la pièce est possible autour de l'axe 1-2, donc autour de $Ox$.

*b*) **Conclusions.**

- **Le nombre de degrés de liberté bloqués est égal au nombre de touches** : 3 touches, 3 degrés de liberté : une translation (suivant $Oz$) et deux rotations (suivant $Ox$ et $Oy$).
- Si on ajoutait une quatrième touche dont la normale de contact serait parallèle (ou concourante) avec celle des trois autres, aucun degré de liberté supplémentaire ne serait bloqué : elle est donc inutile et on peut affirmer qu'**il ne peut y avoir, dans un repérage isostatique, plus de 3 normales de contact concourantes.**

*c*) **Rôle des touches 4 et 5.**

Elles s'opposent à la translation de la pièce suivant $Ox$ et à sa rotation suivant $Oz$ : c'est évident, il suffit d'examiner la *figure 11.* L'efficacité des touches 4 et 5 est d'autant plus grande qu'elles sont éloignées.

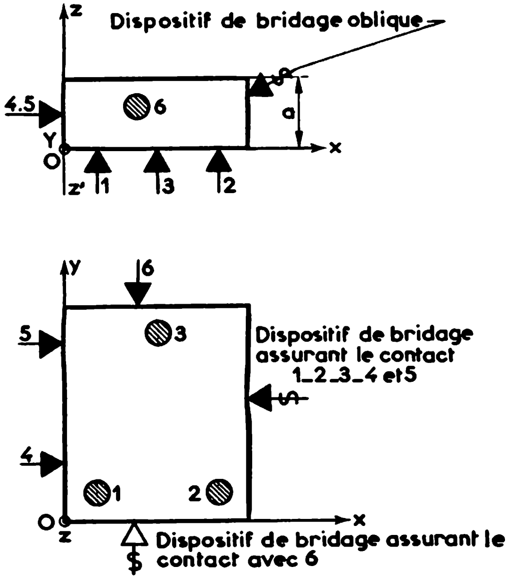



*Fig.* 11.

*d*) **Rôle de la touche 6** : elle s'oppose à la translation suivant O*y*

— Si on examine la situation créée par la suppression de l'une des touches 4 ou 5, par exemple la touche 5, on constate que la pièce est animée d'une rotation autour d'un axe I parallèle à O*z* quand elle reste en contact avec 4 et 6.

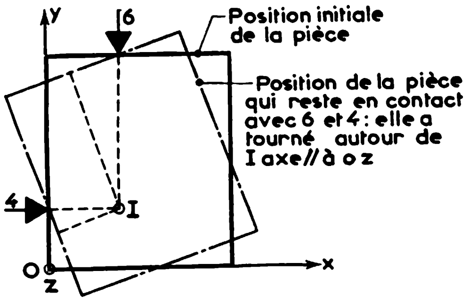



*Fig.* 12.

*e*) **Remarque** : Les trois touches 4, 5, 6 ont permis de bloquer les trois autres degrés de liberté : deux translations suivant O*y* et O*x*, une rotation autour de O*z*.

Si les trois touches avaient eu leurs normales concourantes ou parallèles, un degré de liberté n'aurait pas été bloqué.

## VI — EXEMPLES DE MISE EN POSITION ISOSTATIQUE D'UNE PIÈCE.

La mise en situation d'une pièce sur une machine a pour objet de disposer les surfaces à usiner dans des positions qui permettront à l'outil de réaliser, avec toute l'exactitude désirable, les cotes fonctionnelles et de position.

Nous allons étudier quelques cas simples destinés à illustrer l'exemple qui vient d'être étudié avec soin.

1° ***Pièce cylindrique.***

Cylindre long : *figure 13.*

L'usinage de la rainure est conditionné par les cotes *a, b, c, d.*

Le cylindre est usiné partout. Ses axes de référence sont O*x*, O*y*, O*z*. Seul l'axe O*y* a une position précise. Il devra être disposé parallèle à l'axe correspondant de la fraiseuse.

La pièce sera supportée par 4 touches dont les normales sont deux à deux concourantes : 1 et 2, 3 et 4 assurent à l'axe O*y* une position précise par rapport au support de la pièce.

Elles bloquent les degrés de liberté suivants.

Translations suivant O$x$, O$z$.

Rotations suivant des axes parallèles à O$x$ et O$z$.

Il y a 4 touches et 4 degrés de liberté bloqués.

Il reste deux degrés de liberté :

Translation suivant O$y$ : on placera une touche 5 qui permettra d'installer la cote $b$.

Rotation autour de O$y$ : la position de la rainure n'ayant aucune exigence de position angulaire par rapport à la surface cylindrique, il n'y a pas lieu de prévoir une touche 6.

Le dispositif de bridage permet d'assurer le contact de la pièce avec les touches et son immobilisation.

**Remarque** : Si le plan axial de la rainure avait dû être situé à 90° de l'axe d'un trou déjà percé sur la pièce cylindrique, il aurait fallu ajouter une 6e touche pour supprimer la rotation autour de O$y$ (voir vue 13 *bis*, *figure 13*).

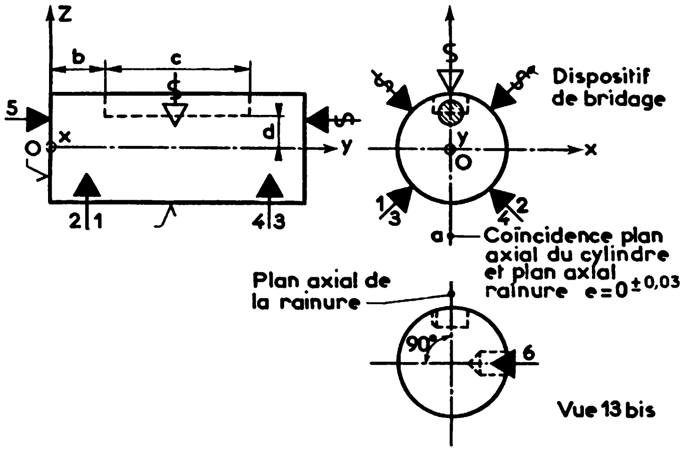



*Fig.* 13.

***Pièce mécanique de forme plus complexe : levier (fig. 14).***

La pièce est en fonte à graphite sphéroïdal et se présente à l'état brut.

Les premières opérations d'usinage à réaliser sont : le dressage d'une face du bossage et le perçage et l'alésage du trou.

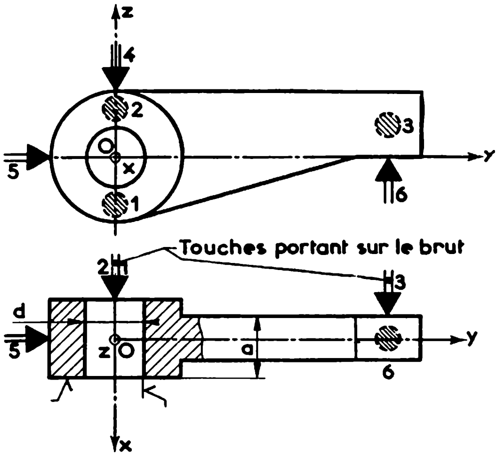



*Fig.* 14.

*a*) Les trois touches 1, 2, 3 permettent de réaliser la cote *a* qui est assortie d'une tolérance de parallélisme du brut avec la surface usinée.
Elles bloquent 3 degrés de liberté :
Translation suivant O$x$.
Rotations suivant O$y$ et O$z$.
1 et 2, 1 et 3, 2 et 3 doivent être aussi éloignées que possible.

*b*) Les deux touches 4 et 5 ont pour objet de bloquer les translations suivant O$z$ et O$y$ et, de ce fait, de centrer l'alésage au bossage brut.

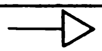
*c*) La touche 6 s'oppose à la rotation du levier autour de l'axe O$x$.
De toute évidence, il importe que le dispositif de bridage assure le contact de la pièce avec les 6 touches.

Les élèves sont invités à rechercher parmi les usinages exécutés à l'atelier et aussi les ensembles étudiés en dessin, des exemples de mise en position isostatique.

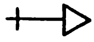
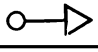
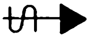
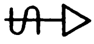
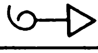
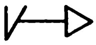
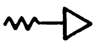
## SYMBOLES DES TOUCHES
## PERMETTANT DE TRADUIRE SUR LES DESSINS
## LA POSITION ISOSTATIQUE DES PIÈCES

Le tableau ci-dessous reproduit des extraits de la norme NFE 40-013.

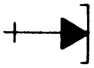
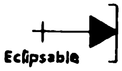
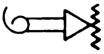
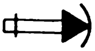
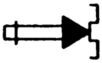
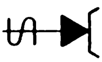
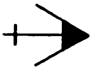
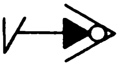
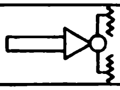
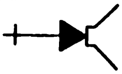
### Symboles élémentaires

| Nature de la surface | Symbole | | |
|---|---|---|---|
| Surface usinée | | un seul trait |  |
| Surface brute | | deux traits | |

### Symboles des types de technologie

| Symbole | Type technologique | |
|---|---|---|
| Appui fixe | |  |
| Centrage fixe | |  Précentrage |
| Système à serrage |  |  |
| Système à serrage concentrique | |  Flottant |
| Système de soutien irréversible | |  |
| Système de soutien réversible | |  |

## Exemples de symboles composés

| Symbole | Signification |
|---|---|
|  | Touche plate fixe de départ d'usinage en appui sur une surface usinée. |
|   | Touche plate éclipsable de départ d'usinage en appui sur une surface usinée. |
|  | Mors striés à serrage concentrique flottant utilisés comme entraîneurs sur une surface brute. |
|  | Touche bombée fixe de départ d'usinage sur une surface brute. |
|  | Touche dégagée fixe de départ d'usinage sur une surface brute. |
|  | Cuvette axile utilisée comme point de départ d'usinage sur une surface usinée. |
|  | Pointe fixe axile utilisée comme point de départ d'usinage sur une surface usinée. |
|  | Pointe tournante axile de poupée mobile utilisée comme point de départ d'usinage sur une surface usinée. |
|  | Palonnier de bridage possédant des mors striés, sur une surface brute. |
|  | Vé axile servant de point de départ d'usinage sur une surface usinée. |

# MÉTROLOGIE INDUSTRIELLE

# Notions sur l'interchangeabilité des pièces et sur le système international à limites

## CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

### A. — Unités employées

Les pièces utilisées en construction mécanique comportent des surfaces restant brutes de laminage, de forge, de fonderie, de scie, des surfaces usinées mais non assemblées et des surfaces usinées assemblées à d'autres surfaces, c'est-à-dire ajustées.

Les dimensions des pièces ou cotes sont, en construction mécanique, indiquées en millimètres. *Exemple* : 45,1. Lorsqu'une cote dépasse 1 m, elle est indiquée en millimètres, ou encore par le nombre de mètres, suivi du nombre de millimètres. *Exemple* : 1,050 m.

Notons que l'on utilise souvent les sous-multiples du millimètre : *le dixième de mm* : 0,1 ; *le centième de mm* : 0,01 ; *le millième de mm* ou *micron* : 0,001 = 1 µ.

En menuiserie, les dimensions des pièces sont exprimées en centimètres. Seules les épaisseurs des planches sont données en millimètres.

### B. — Assemblage des pièces

#### 1° Éléments de l'assemblage.

intérieur → mâle ou contenu ; extérieur → femelle ou contenant

Dans le cas du cylindre, le contenu est appelé l'*arbre*, et le contenant, l'*alésage*.

Un ajustement ou assemblage a du jeu si la dimension de l'élément contenant est plus grande que celle de l'élément contenu. Dans le cas contraire, on dit qu'il y a serrage.

Le mode d'ajustement dépend de la valeur relative du jeu ou du serrage par rapport aux cotes des pièces.

**Un jeu ou un serrage ne se mesurent pas. Ils se calculent en effectuant la différence des cotes de la partie femelle et de la partie mâle. Ils peuvent également s'apprécier au toucher par le mouvement relatif des deux pièces.**

## 2° Réalisation pratique des ajustements.

### a) *Première méthode.*

**On confie à un ouvrier le soin d'exécuter la pièce mâle à la cote approximative (mesure avec un pied à coulisse ou un palmer). Ensuite, il usine la pièce femelle en utilisant la pièce mâle comme calibre. Cette méthode qui dépend essentiellement de l'habileté manuelle de l'ouvrier et de son habitude à apprécier les jeux, est de plus en plus abandonnée : très onéreuse, elle nécessite de nombreux tâtonnements ; en outre, elle ne permet pas l'interchangeabilité.**

### b) *Deuxième méthode.*

**Pour obtenir l'assemblage désiré, on se fixe :**

- **— le jeu (valeur déterminée par la pratique),**
- **— la cote d'un élément (élément femelle par exemple) :**

**On détermine la cote de l'élément mâle.**

**On fait exécuter à l'atelier chaque pièce séparément, aux cotes préalablement déterminées.**

**Si l'usinage a été correct, la présentation ultérieure des pièces donnera l'assemblage désiré.**

# C. — Tolérances de fabrication

**Comme il est impossible d'exécuter une pièce à une cote rigoureuse, on doit se fixer des tolérances de fabrication, afin que chaque pièce soit obtenue à une cote comprise entre les deux valeurs limites choisies. Une tolérance de fabrication, encore appelée *tolérance d'usinage*, se désigne de la façon suivante : $75^{-50}_{-150}$ (Les chiffres 50 et 150 représentent des microns.)**

**Cela signifie que la pièce à exécuter doit avoir une cote comprise entre 74,95 et 74, 85. L'écart entre les cotes maxi et mini doit être le plus grand possible, pour que, sans nuire à son emploi, la pièce soit facilement réalisable dans le temps minimum, donc le plus économiquement possible.**

**De cet écart, dépendent évidemment le choix du mode d'usinage et la machine sur laquelle on exécutera la pièce.**

**Exemple.**

**Un arbre coté $40^{-0}_{-50}$ peut être usiné et fini au tour.**

**Un arbre coté $40^{-0}_{-20}$ doit être terminé sur une rectifieuse.**

## D. — Définitions des différents jeux et diamètres

**Considérons un arbre qui doit tourner dans un coussinet.** Le diamètre porté sur le plan est 80 : c'est le **diamètre nominal** de l'arbre et du coussinet. Pour que la lubrification se fasse normalement, il doit exister un jeu voisin de 0,1 (chiffre donné par l'expérience). Ce jeu égal à 0,1, pris comme jeu moyen de l'ajustement, est appelé encore **jeu systématique de fonctionnement.**

Donnons-nous, comme **cote moyenne** de l'alésage : 80,02 et comme **tolérance de fabrication** ± 0,02. La cote de l'alésage est donc $80^{+40}_{0}$.

Si l'on choisit les **tolérances de fabrication** de l'arbre égales à ± 0,03, les cotes de ce dernier sont immédiatement déterminées ; cote moyenne :

$$80{,}02 - 0{,}1 = 80 - 0{,}08.$$

La cote de l'arbre s'écrit : $80^{-50}_{-110}$.

Le **jeu maximum** est obtenu si l'alésage est exécuté à son plus grand diamètre et l'arbre à son plus petit. Il a pour valeur

$$80{,}04 - 79{,}89 = 0{,}15.$$

Le **jeu minimum** est $80 - 79{,}95 = 0{,}05$.

Le **jeu moyen** est bien égal à

$$0{,}1 = 80{,}02 - 79{,}92 = \frac{0{,}15 + 0{,}05}{2}.$$

Il est bien évident que le fonctionnement ne doit pas être compromis si le jeu est minimum : 0,05 ou maximum : 0,15.

# SYSTÈME INTERNATIONAL A LIMITES

Un comité comprenant des techniciens de toutes les nations a été chargé de fixer les caractéristiques dimensionnelles des divers ajustements. Ce comité est appelé *International System Organization*, et on le désigne par ses initiales : I. S. O.

Un assemblage dépend :

1° **De la précision d'exécution** de chaque pièce, c'est-à-dire des **tolérances** de fabrication.

2° **De la position relative** des cotes extrêmes de la pièce femelle par rapport à celles de la pièce mâle (jeu de fonctionnement).

Nous allons étudier les conventions prévues pour la cotation des éléments et ensuite, les conditions d'assemblage.

# A. — Principales caractéristiques résultant de la cotation des éléments

Supposons un élément mâle ou femelle coté $50^{+11}_{-6}$. Les caractéristiques de cet élément sont données sur la *figure* 1.

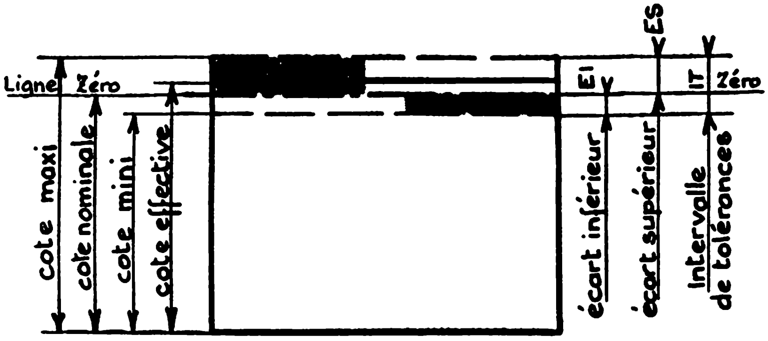



*Fig.* 1. — **Caractéristiques de cotation d'un élément mâle ou femelle.**

**Cote nominale :**

cote de la pièce exprimée par le nombre entier de millimètres. Ici : 50.

**Cote effective :**

dimension réelle de la pièce réalisée.
Nous supposerons ici : 50,007.

**Cote maximum :**

dimension maximum que peut avoir la pièce réalisée.
Ici, cote maxi : 50,011.

**Cote minimum :**

dimension minimum que peut avoir la pièce réalisée.
Ici, cote mini : 50 — 0,006 = 49,994.

**Tolérance de fabrication ou intervalle de tolérance IT :**

différence entre les cotes maxi et mini.
Ici, nous avons IT = 50,011 — 49,994 = 0,017 = 17 μ.

**Écart supérieur ES :**

différence algébrique entre la cote maxi et la cote nominale
Ici, ES = 50,011 — 50 = 0,011 = 11 μ.

**Écart inférieur EI :**

différence algébrique entre la cote mini et la cote nominale.
Ici, EI = 49,994 — 50 = — 0,006 = — 6 μ.

*Remarque.* — Pour désigner une cote avec ses tolérances, on écrit la cote nominale et, à sa suite, l'écart supérieur et l'écart inférieur superposés, en microns :

$$C_{EI}^{ES} = 50_{-\ 6}^{+\ 11}.$$

**Ligne zéro :**

sur les représentations graphiques, la *ligne zéro* représente le contour de la pièce tracée à la cote nominale.

## B. — Représentation des tolérances dans le système international I. S. O.

Dans le **système international à limites**, on définit :

1° **La qualité** ou tolérance de fabrication.

2° **La position** des cotes extrêmes de chaque pièce, mâle et femelle, par rapport à la cote nominale (on conditionne ainsi d'une façon très générale les jeux de fonctionnement).

### 1° Qualité.

Elle définit la tolérance de fabrication, c'est-à-dire l'intervalle de tolérance.

Elle est représentée par un **numéro** de 1 à 11. Plus la tolérance de fabrication est grande, plus le numéro est élevé. Les qualités de 5 à 10 sont les plus employées. Les qualités de 1 à 3 sont réservées à la fabrication des instruments de mesure. Pour une même qualité, les tolérances de fabrication sont d'autant plus importantes que la cote nominale est grande.

Le *tableau* suivant donne la correspondance, pour quelques qualités, des diamètres exprimés en mm et des intervalles de tolérance exprimés en microns.

| DIAMÈTRES en mm | | de 1 à 3 | de 3 à 6 | de 6 à 10 | de 10 à 18 | de 18 à 30 | de 30 à 50 | de 50 à 80 | de 80 à 120 | de 120 à 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Intervalles de tolérance I.T. en microns | Qualité 5 ..... | 5 | 5 | 6 | 8 | 9 | 11 | 13 | 15 | 18 |
| | Qualité 6 ..... | 7 | 8 | 9 | 11 | 13 | 16 | 19 | 22 | 25 |
| | Qualité 7 ..... | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| | Qualité 8 ..... | 14 | 18 | 22 | 27 | 33 | 39 | 46 | 54 | 63 |
| | Qualité 9 ..... | 25 | 30 | 36 | 43 | 52 | 62 | 74 | 87 | 100 |
| | Qualité 10 .... | 40 | 48 | 58 | 70 | 84 | 100 | 120 | 140 | 160 |

## 2° Position des cotes extrêmes par rapport à la cote nominale.

Pour chaque qualité, un certain nombre d'arbres et d'alésages ont été normalisés. Les arbres ou les alésages qui ont la même tolérance de fabrication diffèrent les uns des autres par les écarts existant entre les cotes extrêmes et la cote nominale. Chaque **arbre** est désigné par une **lettre minuscule n, m, k, j, h, g, f, e,** chaque **alésage** par une **lettre majuscule N, M, K, J, H, G, F, E.**

La lettre **h** représente l'arbre dont la cote maximum est égale à la cote nominale.

La lettre **H** représente l'alésage dont la cote minimum est égale à la cote nominale.

— Les **arbres,** dont la position est désignée par une lettre située avant **h** dans la liste alphabétique **a, b, c, d, e, f, g,** ont leur *cote maximum inférieure* à la cote nominale : l'écart supérieur ES est donc *négatif.* La valeur absolue de cet écart diminue quand le symbole de position va de **a** vers **h.**

  Pour toutes les autres positions, **i, j, k, m, n, ...,** le *diamètre maxi* de l'arbre est *supérieur* à la cote nominale ; ES croît avec le rang de la lettre par rapport à **h.**

— Les **alésages,** dont la position est désignée par une lettre située avant **H** dans la liste alphabétique **A, B, C, D, E, F, G,** ont leur *cote minimum supérieure* à la cote nominale. L'écart inférieur EI est *positif.* La valeur de cet écart diminue quand le symbole de position va de **A** vers **H.**

  Pour toutes les autres positions, **I, J, K, M, N, ...,** le *diamètre minimum* est *inférieur* à la cote nominale ; EI est négatif, et sa valeur absolue croît avec le rang de la lettre symbole de position par rapport à **H.**

Les représentations graphiques des arbres et alésages illustrent cette convention.

Une tolérance d'usinage normalisée se représente par un symbole que l'on écrit après le nombre de cote nominale et qui comprend une lettre (position) suivie d'un chiffre (qualité).

Exemples.

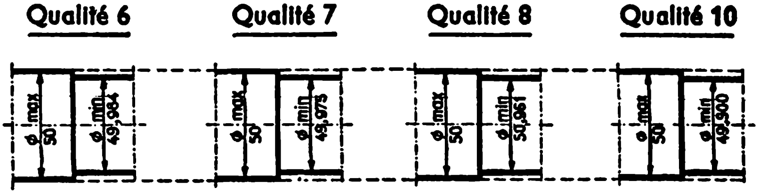
**85 g6** pour un arbre et **85 H7** pour un alésage, signifie, si l'on se reporte au *tableau* de la page 214, que l'arbre a une cote comprise entre 85 — 0,012 = 84,988 et 85 — 0,034 = 84,966, et l'alésage une cote comprise entre 85 et 85,035.

**Sur un dessin d'ensemble,** lorsqu'on doit coter un ajustement, on fait suivre la cote nominale des symboles de tolérance de l'alésage et de l'arbre : **85 H7 g6.**

Un alésage nécessitant l'emploi d'outils spéciaux : alésoirs, broches de mandrinage, on convient, pour diminuer les frais d'outillage, de n'utiliser en principe que les alésages correspondant à la **position H.** Ils sont appelés **alésages normaux.** Pour réaliser les différents ajustements, il suffit de faire varier la position de l'arbre.

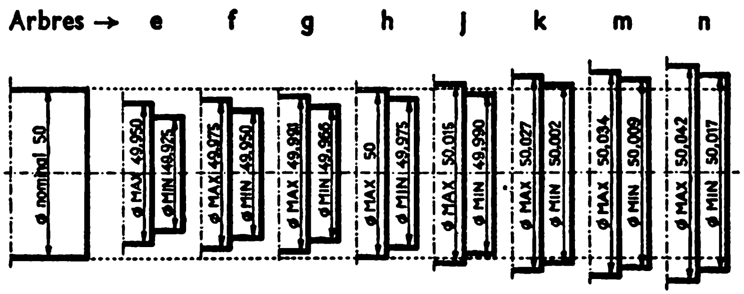
## 3° Représentation graphique des arbres normalisés.

**a)** ***Mise en évidence de la notion de qualité.***




**Les cotes indiquées correspondent à la position h.**

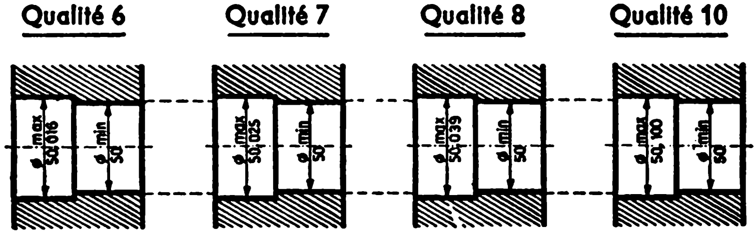
**b)** ***Mise en évidence de la notion de position.***




**Les cotes indiquées correspondent à la qualité 7.**

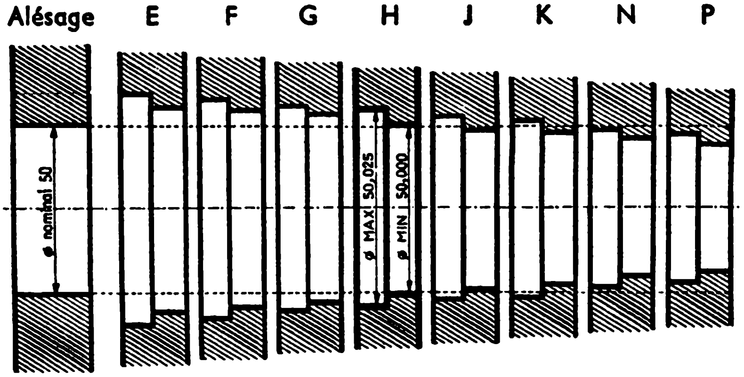
## 4° Représentation graphique des alésages normalisés.

**a)** ***Mise en évidence de la notion de qualité.***




**Les cotes indiquées correspondent à la position H.**

**b) *Mise en évidence de la notion de position.***




Les cotes indiquées correspondent à la qualité 7

## 5° Contrôle des pièces.

Le contrôle des pièces se fait au moyen de **vérificateurs à limites** décrits plus loin . tampons, jauges, broches, calibres mâchoires.

Ces vérificateurs ont des dimensions fixes. Afin d'éviter les frais d'outillage, il est recommandé de choisir les cotes des parties à assembler parmi les nombres normaux.

Ces nombres normaux constituent les termes des progressions géométriques ayant pour raison $\sqrt[5]{10}$, $\sqrt[10]{10}$, $\sqrt[20]{10}$. On obtient ainsi les séries dites *séries Renard* : R*a*5, R*a*10, R*a*20.

SÉRIES DES NOMBRES NORMAUX

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R*a* 5 | 4 | | 6 | | 10 | | 16 | | 25 |
| R*a* 10 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 |
| R*a* 20 | 4 - 4,5 - 5 - 5,5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 14 - 16 - 18 - 20 - 22 - 25 | | | | | | | | |
| R*a* 5 | 25 | | 40 | | 63 | | 100 | | 160 |
| R*a* 10 | 25 | 32 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 |
| R*a* 20 | 25 - 28 - 32 - 36 - 40 - 45 - 50 - 56 - 63 - 70 - 80 - 90 - 100 - 110 - 125 - 140 - 160 | | | | | | | | |
| R*a* 5 | 160 | | 250 | | 400 | | 630 | | |
| R*a* 10 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | | |
| R*a* 20 | 160 - 180 - 200 - 220 - 250 - 280 - 315 - 355 - 400 - 450 - 500 - 560 - 630 | | | | | | | | |

# ÉTUDE DES AJUSTEMENTS

Nous allons étudier trois types d'ajustements : ajustement **avec jeu**, ajustement **avec serrage**, ajustement **incertain**.

Pour traiter les deux derniers cas, nous utiliserons les résultats trouvés pour le premier.

## 1° Ajustement avec jeu.

Soit un ajustement de cote nominale A (*fig.* 2). La cote mini de l'alésage est supérieure à la cote maxi de l'arbre.

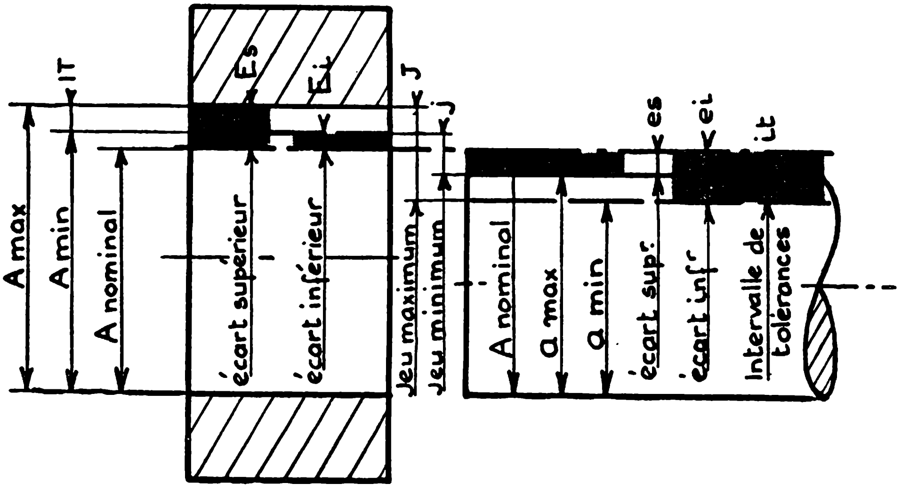



***Fig.* 2. — Caractéristiques de cotation de pièces ajustées.**

— L'alésage est coté $A_{EI}^{ES}$, soit par exemple : **60 G7** = $60^{+40}_{+10}$.
On a donc : ES = + 40 μ ; EI = + 10 μ.

IT = ES — EI = 40 — 10 = 30 μ.

— L'arbre est coté $A_{ei}^{es}$, soit par exemple : **60 f7** = $60^{-30}_{-60}$.
On a donc : *es* = — 30 μ ; *ei* = — 60 μ.

*it* = *es* — *ei* = — 30 — (— 60) = 30 μ.

**Caractéristiques de l'alésage :**

*Cote maximum* : $A_{max}$ = A + ES = 60 + 0,040.
$A_{max}$ = 60,040.

*Cote minimum* : $A_{min}$ = 60 + EI = 60 + 0,010.
$A_{min}$ = 60,010.

*Cote moyenne :* $A_{moy} = \dfrac{A_{max} + A_{min}}{2} = \dfrac{A + ES + A + EI}{2}$

$A_{moy} = A + \dfrac{ES + EI}{2} = 60 + \dfrac{0{,}040 + 0{,}010}{2}$

$A_{moy} = 60{,}025.$

**Caractéristiques de l'arbre :**

*Cote maximum :* $a_{max} = A + es = 60 + (-\ 0{,}030).$

$a_{max} = 59{,}970.$

*Cote minimum :* $a_{min} = A + ei = 60 + (-\ 0{,}060).$

$a_{min} = 59{,}940.$

*Cote moyenne :* $a_{moy} = \dfrac{a_{max} + a_{min}}{2} = \dfrac{A + es + A + ei}{2}$

$a_{moy} = A + \dfrac{es + ei}{2} = 60 + \dfrac{(-0{,}030) + (-0{,}060)}{2}$

$a_{moy} = 60 - \dfrac{0{,}030 + 0{,}060}{2}$

$= 59{,}955.$

— ***Jeu maximum :***

$J = D_{max}$ *alésage* — $D_{min}$ *arbre.*

$J = A_{max} - a_{min}.$

$J = A + ES - (A + ei)$

$J = ES - ei.$

$\underset{\text{alésage}}{\downarrow} \quad \underset{\text{arbre}}{\downarrow}$

$J = 40 - (-\ 60) = 100\ \mu.$

— ***Jeu mini :***

$j = D_{min}$ *alésage* — $D_{max}$ *arbre.*

$j = A + EI - (A + es)$

$j = EI - es = 10 - (-30) = 40\ \mu.$

— ***Jeu moyen :***

$D_{moy}$ *alésage* — $D_{moy}$ *arbre.*

$= A + \dfrac{ES + EI}{2} - \left(A + \dfrac{es + ei}{2}\right)$

$= \dfrac{ES + EI}{2} - \dfrac{es + ei}{2}$

$= \dfrac{40 + 10}{2} - \dfrac{-30 - 60}{2} = 25 + 45 = 70\ \mu.$

## 2° Ajustement avec serrage.

**Le serrage peut être considéré comme un jeu négatif.**

**La cote mini de l'arbre est supérieure à la cote maxi de l'alésage. Conservons les mêmes notations que précédemment.**

**Considérons l'ajustement 40 H7 p6.**

**Alésage :** Diamètre : $40^{+25}_{0}$.
Écarts : ES = 25, EI = 0.

**Arbre :** Diamètre : $40^{+42}_{+26}$.
Écarts : *es* = 42, *ei* = 26.

— ***Jeu maxi :*** $J = ES - ei$.
$= 25 - 26 = -1$ = serrage mini.

**Le serrage est un jeu négatif.**

— ***Jeu mini :*** $j = EI - es$.
$= 0 - 42 = -42$ = serrage maxi.

— ***Jeu moyen :***

$$= \frac{ES + EI}{2} - \frac{es + ei}{2}.$$

$$= \frac{25 + 0}{2} - \frac{42 + 26}{2} = -21{,}5 = \text{serrage moyen.}$$

## 3° Ajustement incertain.

**Considérons l'ajustement 40 H7 n6.**

**Alésage :** Diamètre : $40^{+25}_{0}$.
Écarts : ES = 25, EI = 0.

**Arbre :** Diamètre : $40^{+33}_{+17}$.
Écarts : *es* = 33, *ei* = 17.

— ***Jeu maxi :*** $J = ES - ei$.
$= 25 - 17 = 8$.

— ***Jeu mini :*** $j = EI - es$.
$= 0 - 33 = -33$ = serrage.

— ***Jeu moyen :***

$$= \frac{ES + EI}{2} - \frac{es + ei}{2}.$$

$$= \frac{25 + 0}{2} - \frac{33 + 17}{2} = -12{,}5 = \text{serrage.}$$

**Ainsi, dans la majorité des cas, on aura un ajustement avec serrage. Mais on pourra cependant avoir dans quelques cas un ajustement avec jeu.**

| | | Alésages normaux | | | | Arbres | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DIAMÈTRES en mm | | $H_6$ | $H_7$ | $H_8$ | $H_{11}$ | $g_5$ | $h_5$ | $k_5$ | $g_6$ | $h_6$ | $j_6$ | $k_6$ | $m_6$ | $n_6$ | $p_6$ |
| de 1 à 3 | max. | +7 | +9 | +14 | +60 | −3 | 0 | | −3 | 0 | +6 | | +9 | +13 | +16 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −8 | −5 | | −10 | −7 | −1 | | +2 | +6 | +9 |
| de 3 à 6 | max. | +8 | +12 | +18 | +75 | −4 | 0 | | −4 | 0 | +7 | | +12 | +16 | +20 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −9 | −5 | | −12 | −8 | −1 | | +4 | +8 | +12 |
| de 6 à 10 | max. | +9 | +15 | +22 | +90 | −5 | 0 | +7 | −5 | 0 | +7 | +10 | +15 | +19 | +24 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −11 | −6 | +1 | −14 | −9 | −2 | +1 | +6 | +10 | +15 |
| de 10 à 14 | max. | +11 | +18 | +27 | +110 | −6 | 0 | +9 | −6 | 0 | +8 | +12 | +18 | +23 | +29 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −14 | −8 | +1 | −17 | −11 | −3 | +1 | +7 | +12 | 18 |
| de 14 à 18 | max. | +11 | +18 | +27 | +110 | −6 | 0 | +9 | −6 | 0 | +8 | +12 | +18 | +23 | +29 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −14 | −8 | +1 | −17 | −11 | −3 | +1 | +7 | +12 | +18 |
| de 18 à 24 | max. | +13 | +21 | +33 | +130 | −7 | 0 | +11 | −7 | 0 | +9 | +15 | +21 | +28 | +35 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −16 | −9 | +2 | −20 | −13 | −4 | +2 | +8 | +15 | +22 |
| de 24 à 30 | max. | +13 | +21 | +33 | +130 | −7 | 0 | +11 | −7 | 0 | +9 | +15 | +21 | +28 | +35 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −16 | −9 | +2 | −20 | −13 | −4 | +2 | +8 | +15 | +22 |
| de 30 à 40 | max. | +16 | +25 | +39 | +160 | −9 | 0 | +13 | −9 | 0 | +11 | +18 | +25 | +33 | +42 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −20 | −11 | +2 | −25 | −16 | −5 | +2 | +9 | +17 | +26 |
| de 40 à 50 | max. | +16 | +25 | +39 | +160 | −9 | 0 | +13 | −9 | 0 | +11 | +18 | +25 | +33 | +42 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −20 | −11 | +2 | −25 | −16 | −5 | +2 | +9 | +17 | +26 |
| de 50 à 65 | max. | +19 | +30 | +46 | +190 | −10 | 0 | +15 | −10 | 0 | +12 | +21 | +30 | +39 | +51 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −23 | −13 | +2 | −29 | −19 | −7 | +2 | +11 | +20 | +32 |
| de 65 à 80 | max. | +19 | +30 | +46 | +190 | −10 | 0 | +15 | −10 | 0 | +12 | +21 | +30 | +39 | +51 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −23 | −13 | +2 | −29 | −19 | −7 | +2 | +11 | +20 | +32 |
| de 80 à 100 | max. | +22 | +35 | +54 | +220 | −12 | 0 | +18 | −12 | 0 | +13 | +25 | +35 | +45 | +59 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −27 | −15 | +3 | −34 | −22 | −9 | +3 | +13 | +23 | +37 |
| de 100 à 120 | max. | +22 | +35 | +54 | +220 | −12 | 0 | +18 | −12 | 0 | +13 | +25 | +35 | +45 | +59 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −27 | −15 | +3 | −34 | −22 | −9 | +3 | +13 | +23 | +37 |
| de 120 à 140 | max. | +25 | +40 | +63 | +250 | −14 | 0 | +21 | −14 | 0 | +14 | +28 | +40 | +52 | +68 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −32 | −18 | +3 | −39 | −25 | −11 | +3 | +15 | +27 | +43 |
| de 140 à 160 | max. | +25 | +40 | +63 | +250 | −14 | 0 | +21 | −14 | 0 | +14 | +28 | +40 | +52 | +68 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −32 | −18 | +3 | −39 | −25 | −11 | +3 | +15 | +27 | +43 |
| de 160 à 180 | max. | +25 | +40 | +63 | +250 | −14 | 0 | +21 | −14 | 0 | +14 | +28 | +40 | +52 | +68 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −32 | −18 | +3 | −39 | −25 | −11 | +3 | +15 | +27 | +43 |
| de 180 à 200 | max. | +29 | +46 | +72 | +290 | −15 | 0 | +24 | −15 | 0 | +16 | +33 | +46 | +60 | +79 |
| | min. | 0 | 0 | 0 | 0 | −35 | −20 | +4 | −44 | −29 | −13 | +4 | +17 | +31 | +50 |

**Les intervalles prévus pour les diamètres vont de la cote minimum exclue à la cote maximum incluse.**

## A LIMITES I. S. O.

| Arbres | | | | | | | | | Alésages pour roulements | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $e_7$ | $f_7$ | $h_7$ | $s_7$ | $x_7$ | $f_8$ | $h_8$ | $d_{10}$ | $d_{11}$ | $J_6$ | $K_7$ | $N_7$ | $P_7$ | DIAMÈTRES en mm | |
| − 14 | − 7 | − 0 | + 24 | + 31 | − 7 | 0 | − 20 | − 20 | | | | | max. | de 1 à 3 |
| − 23 | − 16 | − 9 | + 15 | + 22 | − 21 | − 14 | − 60 | − 80 | | | | | min. | |
| − 20 | − 10 | 0 | + 31 | + 40 | − 10 | 0 | − 30 | − 30 | | | | | max. | de 3 à 6 |
| − 32 | − 22 | − 12 | + 19 | + 28 | − 28 | − 18 | − 78 | −105 | | | | | min. | |
| − 25 | − 13 | 0 | + 38 | + 49 | − 13 | 0 | − 40 | − 40 | | | | | max. | de 6 à 10 |
| − 40 | − 28 | − 15 | + 23 | + 34 | − 35 | − 22 | − 98 | −130 | | | | | min. | |
| − 32 | − 16 | 0 | + 46 | + 58 | − 16 | 0 | − 50 | − 50 | + 6 | + 6 | − 5 | − 11 | max. | de 10 à 14 |
| − 50 | − 34 | − 18 | + 28 | + 40 | − 43 | − 27 | −120 | −160 | − 5 | − 12 | −23 | − 29 | min. | |
| − 32 | − 16 | 0 | + 46 | + 63 | − 16 | 0 | − 50 | − 50 | + 6 | + 6 | − 5 | − 11 | max. | de 14 à 18 |
| − 50 | − 34 | − 18 | + 28 | + 45 | − 43 | − 27 | −120 | −160 | − 5 | − 12 | −23 | − 29 | min. | |
| − 40 | − 20 | 0 | + 56 | + 75 | − 20 | 0 | − 65 | − 65 | + 8 | + 6 | − 7 | − 14 | max. | de 18 à 24 |
| − 61 | − 41 | − 21 | + 35 | + 54 | − 53 | − 33 | −149 | −195 | − 5 | − 15 | −28 | − 35 | min. | |
| − 40 | − 20 | 0 | + 56 | + 85 | − 20 | 0 | − 65 | − 65 | + 8 | + 6 | − 7 | − 14 | max. | de 24 à 30 |
| − 61 | − 41 | − 21 | + 35 | + 64 | − 53 | − 33 | −149 | −195 | − 5 | − 15 | −28 | − 35 | min. | |
| − 50 | − 25 | 0 | + 68 | +105 | − 25 | 0 | − 80 | − 80 | + 10 | + 7 | − 8 | − 17 | max. | de 30 à 40 |
| − 75 | − 50 | − 25 | + 43 | + 80 | − 64 | − 39 | −180 | −240 | − 6 | − 18 | −33 | − 42 | min. | |
| − 50 | − 25 | 0 | + 68 | +122 | − 25 | 0 | − 80 | − 80 | + 10 | + 7 | − 8 | − 17 | max. | de 40 à 50 |
| − 75 | − 50 | − 25 | + 43 | + 97 | − 64 | − 39 | −180 | −240 | − 6 | − 18 | −33 | − 42 | min. | |
| − 60 | − 30 | 0 | + 83 | +152 | − 30 | 0 | −100 | −100 | + 13 | + 9 | − 9 | − 21 | max. | de 50 à 65 |
| − 90 | − 60 | − 30 | + 53 | +122 | − 76 | − 46 | −220 | −290 | − 6 | − 21 | −39 | − 51 | min. | |
| − 60 | − 30 | 0 | + 89 | +176 | − 30 | 0 | −100 | −100 | + 13 | + 9 | − 9 | − 21 | max. | de 65 à 80 |
| − 90 | − 60 | − 30 | + 59 | +146 | − 76 | − 46 | −220 | −290 | − 6 | − 21 | −39 | − 51 | min. | |
| − 72 | − 36 | 0 | +106 | +213 | − 36 | 0 | −120 | −120 | + 16 | + 10 | −10 | − 24 | max. | de 80 à 100 |
| −107 | − 71 | − 35 | + 71 | +178 | − 90 | − 54 | 260 | −340 | − 6 | − 25 | −45 | − 59 | min. | |
| − 72 | − 36 | 0 | +114 | +245 | − 36 | 0 | −120 | −120 | + 16 | + 10 | −10 | − 24 | max. | de 100 à 120 |
| −107 | − 71 | − 35 | + 79 | +210 | − 90 | − 54 | −260 | −340 | − 6 | − 25 | −45 | − 59 | min. | |
| − 85 | − 43 | 0 | +132 | +288 | − 43 | 0 | −145 | −145 | + 18 | + 12 | −12 | − 28 | max. | de 120 à 140 |
| −125 | − 83 | − 40 | + 92 | +248 | −106 | − 63 | −305 | −395 | − 7 | − 28 | −52 | − 68 | min. | |
| − 85 | − 43 | 0 | +140 | +320 | − 43 | 0 | −145 | −145 | + 18 | + 12 | −12 | − 28 | max. | de 140 à 160 |
| −125 | − 83 | − 40 | +100 | +280 | −106 | − 63 | −305 | −395 | − 7 | − 28 | −52 | − 68 | min. | |
| − 85 | − 43 | 0 | +148 | +350 | − 43 | 0 | −145 | −145 | + 18 | + 12 | −12 | − 28 | max. | de 160 à 180 |
| −125 | − 83 | − 40 | +108 | +310 | −106 | − 63 | −305 | −395 | − 7 | − 28 | −52 | − 68 | min. | |
| −100 | − 50 | 0 | +168 | +396 | − 50 | 0 | −170 | −170 | + 22 | + 13 | −14 | − 33 | max. | de 180 à 200 |
| − 46 | − 96 | − 46 | +122 | +350 | −122 | − 72 | −355 | −460 | − 7 | − 33 | −60 | − 79 | min. | |

*Exemple.* — Intervalle de 40 à 50 = de 40 exclu à 50 inclus.

# Ajustements recommandés

## 1° Ajustements pièces immobiles l'une par rapport à l'autre.

| | | H6 | H7 | H8 | H11 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ajustement libre : très libre | | | | *d*10 | *d*11 |
| libre | | | | *f*8 | |
| Centrage précis : moyeux clavetés | | | *h*6<br>*h*7 | *h*8 | |
| Centrage très précis pour outillage | | *h*5 | | | |
| Centrage précis légèrement dur | | | *j*6 | | |
| Immobilisation en rotation sans transmission d'efforts<br>Montage et démontage sans détérioration au maillet | acier/acier | | *m*6 | | |
| | acier/bronze ou aluminium | | *n*6 | | |
| Immobilisation avec transmission d'efforts axiaux<br>Montage à la presse ou par dilatation ou retrait de l'un des éléments<br>Démontage avec détérioration des pièces assemblées | acier/acier | | *p*6<br>*s*7 | | |
| | acier/bronze ou aluminium | | | *x*7 | |

## 2° Ajustements pièces mobiles l'une par rapport à l'autre.

| | H6 | H7 | H8 | H11 |
|---|---|---|---|---|
| Ajustement glissant ou tournant librement. Précision faible | | | | *d*11 |
| Ajustement glissant ou tournant. Précision moyenne | | | *f*8 | |
| Ajustement glissant ou tournant dans une bague ou un coussinet. Bonne précision : | | | | |
| — Charge élevée, possibilité de dilatation, longue portée, vitesse élevée, risque d'erreur d'alignement | | *e*7 | | |
| Peu de risque de dilatation, bon graissage ou vitesse réduite | | *f*7 | | |
| Ajustement précis glissant, vitesse modérée | | *g*6 | | |
| Ajustement très précis glissant, vitesse faible ; outillage seulement | *g*5 | | | |

## 3° Ajustements pour roulements à billes ou à rouleaux.

| | ARBRE | LOGEMENT BAGUE EXTÉRIEURE |
|---|---|---|
| **a) *Arbre tournant.*** | | |
| En principe, la bague intérieure est serrée sur l'arbre. | | |
| La bague extérieure peut se déplacer latéralement : | | |
| — roulements à billes non bloqués latéralement | | |
| — roulements à rouleaux coniques, réglage par bague extérieure. | | |
| Centrage moyen, charge moyenne | *k*6 | H6 ou H7 |
| charge élevée | *m*6 | H6 ou H7 |
| Centrage précis, charge moyenne | *k*6 | J6 |
| charge élevée | *m*6 | J6 |
| La bague extérieure n'a pas à se déplacer latéralement. Un freinage contre la rotation de la bague extérieure dans le logement est souhaitable | *k*6 | K6 ou K7 |
| **b) *Logement tournant.*** | | |
| En principe, la bague extérieure est serrée dans le logement Réglage par la bague intérieure | | |
| Roulements à rouleaux cylindrique et conique | | |
| Charges élevées | *h*6 | P7 |
| Roulements à billes et roulements à rouleaux | | |
| Charges légères | *h*6 | N7 |

# APPARIEMENT (1) DES PIÈCES

En construction mécanique moderne, on est quelquefois conduit à réaliser l'assemblage de pièces avec des jeux de fonctionnement très faibles, de l'ordre du millième de millimètre.

Tel est, par exemple, le cas des ensembles cylindre et piston des pompes d'injection pour moteurs Diesel, qui compriment le combustible à une pression souvent supérieure à 2 000 N/cm².

L'exécution en série des cylindres et des pistons, garantissant l'interchangeabilité des pièces, conduirait à fixer des tolérances de fabrication extrêmement serrées.

Si l'on suppose un diamètre nominal de 12, on aurait : alésage du cylindre $12^{+2}_{+1}$ ; diamètre du piston $12^{0}_{-1}$.

— Jeu moyen de fonctionnement : 2 microns.
— Jeu maximum de fonctionnement : 3 microns.
— Jeu minimum de fonctionnement : 1 micron.

(1) Action de mettre par paire.

L'exécution des pièces avec une telle précision serait très difficile, onéreuse, et conduirait à des rebuts importants.

Rompant avec les règles strictes de l'interchangeabilité, les constructeurs ont préféré fixer des tolérances d'usinage plus importantes, permettant d'usiner les pièces sans précautions spéciales.

L'alésage du cylindre est pris, par exemple, égal à $12^{+2}_{+7}$, et le diamètre du piston à $12^{+5}_{+0}$.

Les différentes pièces usinées sont mesurées au micromètre pneumatique Solex de précision et classées par diamètre dans des casiers.

**Cylindres alésés à :**

12,002 — 12,003 — 12,004 — 12,005 — 12,006 — 12,007.

**Pistons aux diamètres de :**

12,000 — 12,001 — 12,002 — 12,003 — 12,004 — 12,005.

**Pour constituer les pompes, on assemblera :**

les cylindres de 12,002 avec les pistons de 12,000,
— de 12,003 — 12,001,
— de 12,004 — 12,002, etc.

On aura ainsi des ensembles dont le jeu de fonctionnement sera rigoureusement égal à 2 microns, et les pompes montées de la sorte donneront des résultats très constants. L'expérience a montré que le nombre de pièces inutilisables est très faible.

# Cotation de fabrication

## TRANSFERT DE COTE D'USINAGE

La définition d'une pièce suppose que les cotes permettant la réalisation des fonctions technologiques soient exprimées sur le dessin *figure 1.* Il s'agit en particulier des cotes $B = 40^{+0,06}_{+0}$ et $C = 8^{+0,1}_{+0}$

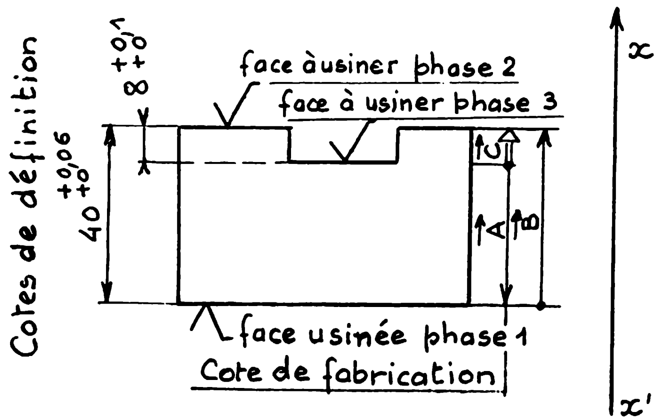



*Fig.* 1.

L'usinage prévu comporte :

Phase 1 : Usinage face inférieure,

Phase 2 : Usinage face supérieure,

Phase 3 : Fraisage de la rainure.

Le réglage de la fraise se fera à partir de la face inférieure. Il est donc nécessaire de déterminer la cote $A$ de façon que la cote $C^{+0,1}_{+0}$ soit respectée. Il importe de définir les tolérances de $A$.

On dit que l'on a fait un **transfert de cote usinée.**

La cote $C$ est de ce fait la résultante des cotes $B$ et $A$.

Utilisons la représentation vectorielle. $\vec{C}$ est la résultante de $\vec{B}$ et $\vec{A}$ : $\vec{C} = \vec{B} + \vec{A}$ (1).

Soit $xx'$ un axe orienté sur lequel on projette les cotes : $\overline{C} = \overline{B} + \overline{A}$ (2); $\overline{C}$ et $\overline{B}$ sont positifs, $\overline{A}$ est négatif.

***Modules des vecteurs cotes et intervalles de tolérances :***

$C = 8$, $\quad ITC = 0{,}1$, $\quad B = 40$, $\quad ITB = 0{,}06$

$A = 40 - 8 = 32$, $\quad ITA$ à déterminer.

Reprenons la relation algébrique (2).

On peut écrire : $\overline{C}_{max} = \overline{B}_{max} + \overline{A}_{max}$ (3).

$\overline{C}_{min} = \overline{B}_{min} + \overline{A}_{min}$ (4).

Retranchons (4) de (3) : $\overline{C}_{max} - \overline{C}_{min} = \overline{B}_{max} - \overline{B}_{min} + \overline{A}_{max} - \overline{A}_{min}$

Soit : **IT*C* = IT*B* + IT*A*** (5).

Cette relation est générale et indépendante du nombre de cotes composantes.

« **L'intervalle de tolérances de la cote résultante $\vec{C}$ est égal à la somme des intervalles de tolérances des cotes composantes $\vec{B}$ et $\vec{A}$.** »

La relation (5) donne :

$$0{,}1 = 0{,}06 + ITA, \quad \text{d'où} \quad ITA = 0{,}1 - 0{,}06 = 0{,}04.$$

Reprenons la relation (3) pour calculer $\overline{A}_{max}$ :

$$\overline{A}_{max} = \overline{C}_{max} - \overline{B}_{max}$$

$$\overline{A}_{max} = 8{,}1 - 40{,}06 = -31{,}96 \quad \text{soit} \quad -(32 - 0{,}04).$$

La valeur de $A_{min} = A_{max} - ITA$

$$A_{min} = -31{,}96 - 0{,}04 = -32$$

(—32 est la valeur mini projetée).

On aurait pu trouver ce résultat en utilisant la relation (4) :

$$\overline{A}_{min} = \overline{C}_{min} - \overline{B}_{min} = 8 - 40 = -32.$$

La cote de $A$ s'exprime donc par la valeur arithmétique :

$$A = 32^{+0}_{-0{,}04}.$$

***Remarques***

- Le transfert de cote d'usinage de la cote $C = 8^{+0{,}1}_{+0}$ à la cote $A = 32^{+0}_{0{,}04}$ a réduit l'intervalle de tolérance de 0,1 à 0,04 et a augmenté la précision.
- Le transfert de cote ne peut se faire que si l'intervalle de tolérances de la cote résultante est supérieur à la somme des intervalles de tolérances des cotes composantes.

Si $ITC = ITB + ITB_1 + ITA$ $\quad C$, $B$ et $B_1$ cotes connues, $A$ cote de transfert.

$$ITA = ITC - (ITB + ITB_1) > 0.$$

◇

# Métrologie des fabrications

La *métrologie des fabrications* s'intéresse :

— au contrôle des pièces exécutées ou en cours d'usinage,
— au contrôle, sur machine, de la position de la pièce par rapport à l'outil,
— à la vérification géométrique des machines-outils,
— au contrôle statistique des performances possibles sur chaque machine-outil.

**Le contrôle des pièces** a pour objet de s'assurer que l'objet fabriqué est en tous points conforme au dessin, qui doit avoir parfaitement défini le produit à réaliser (dessin de définition du produit fini).

Or, sur ce dessin, sont inscrites des cotes assorties de leurs tolérances, tolérances relatives à la forme des surfaces et tolérances correspondant à la position relative des différentes surfaces.

Contrôler une pièce conduit à vérifier :

*a*) si les cotes des éléments de la pièce sont comprises entre les cotes maxima et minima prévues ;
*b*) si les surfaces obtenues ont une forme géométrique correcte, compte tenu des tolérances prévues ;
*c*) si les surfaces fonctionnelles ont, les unes par rapport aux autres, les positions prévues sur le dessin, avec la précision imposée.

## VÉRIFICATION DES COTES DES PIÈCES EXÉCUTÉES OU EN COURS D'USINAGE

Une cote est définie par une valeur nominale et une tolérance. *Exemple:* **40 h 7.**

Cette notation signifie que l'élément de pièce coté 40 h7 doit avoir une dimension comprise entre les cotes 40 et 39,975.

Pour se rendre compte si la pièce est exécutée à une dimension convenable, trois méthodes de vérification peuvent être employées :

1° Mesurer la cote exacte de la pièce avec un **instrument de mesure à lecture directe.**

2° Utiliser un **vérificateur à tolérance** qui permet de s'assurer que la cote de la pièce est comprise entre les cotes maxima et minima prévues, sans autre renseignement sur la dimension réelle de la pièce.

3° Comparer la cote de la pièce à celle d'une pièce étalon de dimension connue, très voisine de celle de la pièce. Un appareil de grande précision appelé **comparateur** permet de mesurer l'écart existant entre la cote de la pièce et celle de l'étalon.

# APPAREILS DE MESURE DIRECTE

**Ces appareils sont *à dimension variable* et ont des limites d'emploi plus ou moins étendues.**

## A. — Vérificateur à coulisse

**Le vérificateur à coulisse, plus souvent désigné sous le nom de pied à coulisse représenté sur la *figure* 1, est entièrement en acier inoxydable.**

**La réglette est graduée en millimètres tandis que le coulisseau porte une graduation particulière appelée vernier.**

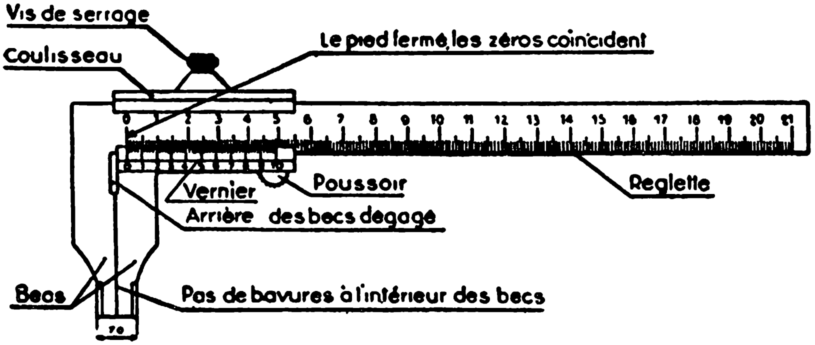



***Fig.* 1. — Pied à coulisse au $\frac{1}{50}$.**

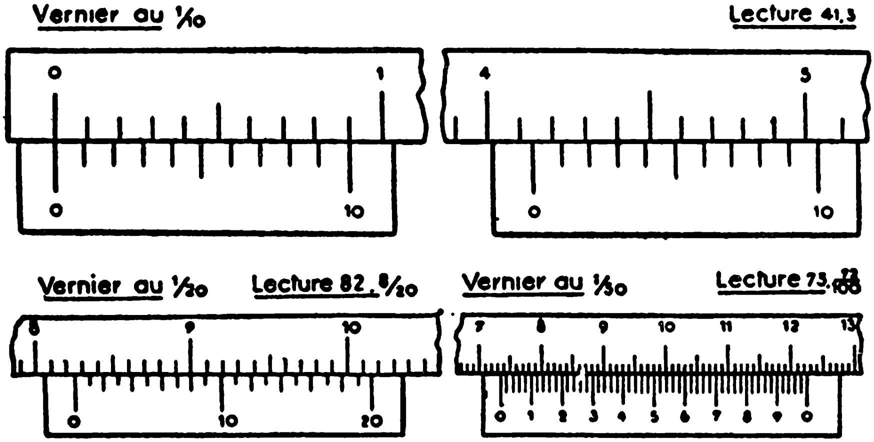



***Fig.* 2. — Principe du vernier.**

**Il existe des verniers au $\frac{1}{10}$ de mm, au $\frac{1}{20}$ de mm, au $\frac{1}{50}$ de mm (voir *fig.* 2).**

## 1° Principe du vernier.

### a) *Vernier au dixième.*

Le vernier au $\frac{1}{10}$ de mm a une longueur de 9 mm divisée en 10 parties égales. Lorsque les becs sont en contact, le zéro de la réglette coïncide avec le zéro du vernier.

Il est évident que l'on a :

Distance entre la division 1 de la règle et la division 1 du vernier = $\frac{1}{10}$ mm

— — — 2 — — 2 — = $\frac{2}{10}$ mm

— — — 3 — — 3 — = $\frac{3}{10}$ mm

et ainsi de suite.

Si l'on écarte les becs de $\frac{1}{10}$ de mm, les divisions 1 de la règle et du vernier seront en coïncidence ; si l'on écarte les becs de $\frac{2}{10}$, les divisions 2 seront en coïncidence et ainsi de suite.

Le même raisonnement pourrait être fait à partir d'une cote exacte quelconque, 41 par exemple ; on conçoit que si la division 3 du vernier coïncide avec une division de la règle, le zéro du vernier étant placé après la division 41 de la règle, l'écartement des becs sera de 41 $\frac{3}{10}$ = 41,3.

### b) *Vernier au vingtième.*

Le vernier au $\frac{1}{20}$ est obtenu en divisant 19 mm en 20 parties égales. La coïncidence des divisions permet d'exprimer les suppléments de cote en $\frac{1}{20}$ de mm

### c) *Vernier au cinquantième.*

Le pied à coulisse au $\frac{1}{50}$ possède un vernier de 49 mm divisé en 50 parties égales

Les cotes se lisent donc en $\frac{1}{50}$ de mm. Les divisions de rang 5-10-15, etc., portent les numéros 1, 2, 3, etc.

Lorsqu'il y a coïncidence de ces divisions avec l'une de celles de la règle, l'écartement des becs est égal à une cote exacte augmentée de $\frac{5}{50}$ de mm, $\frac{10}{50}$, $\frac{15}{50}$, etc. ou $\frac{10}{100}$, $\frac{20}{100}$, $\frac{30}{100}$ de mm ou encore un nombre entier de dixièmes de mm : $\frac{1}{10}$, $\frac{2}{10}$, $\frac{3}{10}$.

Les divisions intermédiaires correspondent à des cinquantièmes de mm $\left(\frac{1}{50}\right)$ ou à des deux-centièmes de mm$\left(\frac{2}{100}\right)$. Ceci explique la lecture de cote $73\frac{72}{100}$ ou 73,72 mm correspondant à la position du vernier représentée sur la *figure* 2.

## 2° Incertitudes de lecture.

Le coulisseau d'un bon pied à coulisse doit glisser sans jeu sur la réglette; il est donc indispensable que celle-ci soit bien calibrée et le ressort de rattrapage de jeu du coulisseau convenablement réglé.

Lorsque le pied est fermé, les becs doivent porter parfaitement et les zéros coïncider.

Fatalement, on ne peut avoir la certitude que la cote lue est exactement celle de la pièce. L'incertitude de lecture résulte :

**1° De la construction même du pied à coulisse :**

- erreurs de graduation (écartements inégaux sur toute la longueur de la règle) ;
- épaisseur des traits tracés sur la réglette et sur le vernier, qui rend imprécise la constatation des concordances entre les graduations.

**2° De l'opérateur :**

- erreur due à la pression des becs sur la pièce, qui a pour effet de provoquer leur déplacement et leur flexion. C'est de beaucoup l'erreur la plus importante et la plus variable, car le pied à coulisse ne possède aucun dispositif pour limiter l'action de l'opérateur sur le coulisseau ;
- erreur visuelle qui dépend, surtout pour le pied au $\frac{1}{50}$, de l'appréciation de la concordance entre les divisions.

## 3° Précision des mesures.

**Un opérateur qui a l'habitude d'utiliser un pied à coulisse ne peut, avec un bon instrument, effectuer une mesure qu'avec une précision :**

de $\pm \frac{1}{50}$ de mm si le pied est au cinquantième,

de $\pm \frac{1}{20}$ — — — vingtième,

et de $\pm \frac{1}{10}$ — — — dixième.

## 4° Mesure des cotes intérieures au pied à coulisse.

**Les pieds à coulisse peuvent être employés pour la mesure du diamètre d'un alésage en utilisant pour cela la partie extérieure des extrémités des becs dont la cote totale est de 10 mm. Le diamètre de l'alésage sera égal à la cote lue + 10 mm.**

Notons, pour mémoire, qu'il existe des pieds à coulisse dont les becs sont prolongés de l'autre côté de la réglette par deux becs de forme particulière : becs croisés pour la mesure directe d'une cote intérieure, becs à anneau, becs pointus, etc.

## B. — Pied de profondeur

La mesure des profondeurs peut être effectuée en utilisant un pied de profondeur (voir *fig.* 3), dont le vernier est au $\frac{1}{10}$ ou au $\frac{1}{20}$.

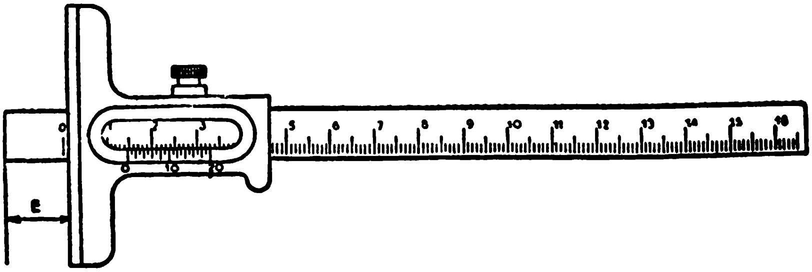


*Fig.* 3. — **Pied de profondeur.**

## C. — Appareils à vis micrométrique

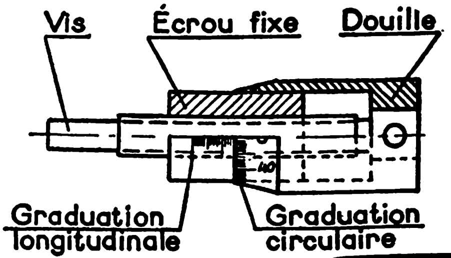



*Fig.* 4. — **Principe de l'appareil à vis micrométrique.** →

Les appareils de mesure à vis micrométrique permettent des lectures de cote à 10 μ et même à 1 μ près. On les désigne sous le nom de **micromètres** en raison de leur aptitude à apprécier des différences de cote d'environ 1 micron.

Ils comprennent une vis à pas fin $p = 1$ mm ou 0,5 mm, usinée avec une grande précision.

Cette vis pénètre dans un écrou qui est généralement fixe et comporte un trait repère (*fig.* 4), ou parfois un vernier circulaire, au dixième (*fig.* 5).

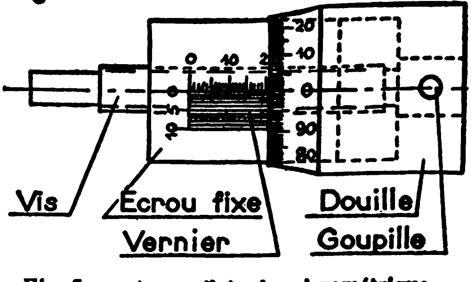



*Fig.* 5. — **Appareil à vis micrométrique et vernier.**

La tête de la vis est graduée en 50 ou 100 parties égales. On conçoit que si la vis est au pas de 1 mm et sa tête graduée en 100 parties égales, une rotation de 1 division, soit $\frac{1}{100}$ de tour, correspond à un déplacement axial de $\frac{1}{100}$ de mm. Si l'on utilisait un vernier circulaire au $\frac{1}{10}$, on pourrait apprécier une rotation de $\frac{\frac{1}{100}}{10} = \frac{1}{1000}$ de tour et, par suite, un déplacement de $\frac{1}{1000}$ de mm, soit 1 $\mu$.

## APPAREIL A VIS MICROMÉTRIQUE POUR LA MESURE DES EXTÉRIEURS

L'appareil porte le nom de **micromètre d'extérieur** ou plus généralement **palmer.**

### 1° Description.

Le palmer permet la mesure de cotes extérieures des pièces, à $\frac{1}{100}$ de millimètre près.

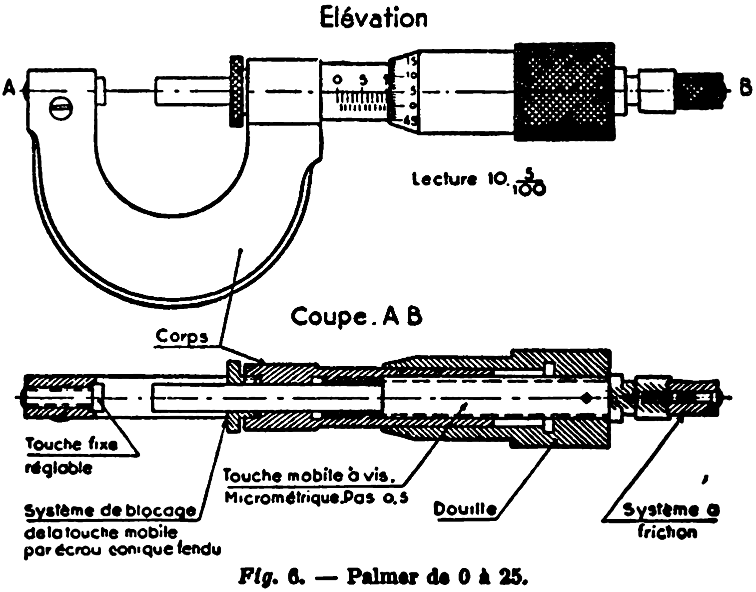



*Fig.* 6. — **Palmer de 0 à 25.**

**Dans la partie cylindrique d'un corps en acier forgé, dont la forme générale est celle d'un C, se visse la partie filetée d'une touche mobile. Cette touche filetée peut recevoir le mouvement de rotation, soit de la douille moletée, soit du bouton également moleté du système à friction.**

La partie cylindrique du corps est graduée en mm et $\frac{1}{2}$ mm suivant une génératrice, tandis que la douille est graduée en 50 parties égales. Lorsque la vis, dont le pas est de 0,5 mm, fait un tour, la touche mobile se rapproche ou s'éloigne de la touche fixe de 0,5 mm. Si la vis fait $\frac{1}{50}$ de tour (1 division de la douille), la touche mobile se déplace de $0{,}5 \times \frac{1}{50} = \frac{1}{100}$ de mm.

Pour effectuer la mesure d'une cote, la pièce étant appliquée sur la touche fixe, on approche la touche mobile en agissant sur la douille et on termine l'accostage par le système à friction. On réalise ainsi, pour toutes les mesures, une pression constante des touches sur les pièces.
Il existe des palmers dont les limites de mesure sont différentes : palmers de 0 à 25, de 25 à 50, de 50 à 75, de 75 à 100, etc.

Pour le palmer de 0 à 25, la coïncidence du zéro de la douille et du zéro de la partie cylindrique du corps est obtenue en réglant la position de la touche fixe. Pour les autres palmers, le réglage à zéro s'effectue de la même façon, mais en interposant entre les deux touches une rondelle ou une pige à bouts sphériques dont le diamètre est 25, 50, 75, etc.

## 2° Incertitudes de lecture.

Le palmer est un instrument *beaucoup plus précis* que le pied à coulisse pour les raisons suivantes :

1° Il permet d'évaluer le $\frac{1}{100}$ de mm.

2° Les erreurs résultant de l'inégalité de pression de l'appareil sur les différentes pièces à mesurer se trouvent éliminées par le système à friction.
3° Les déformations de l'appareil sont négligeables, le corps de l'appareil pouvant avoir une section suffisante pour rendre toute flexion impossible.
4° Les incertitudes de lecture sont très faibles, puisqu'une variation de cote de $\frac{1}{100}$ nécessite la rotation de la douille de la valeur d'une division, équivalente à une longueur développée allant de 1 à 2 mm.

L'erreur dans la mesure d'une cote résulte presque uniquement de la construction ou de l'usure de l'appareil :
— Erreurs de graduation du corps et de la douille.
— Inégalité du pas sur toute la longueur de la vis ou de l'écrou.
— Usure des filets de la vis ou de l'écrou.

Pour un palmer de bonne qualité et en bon état, ces erreurs n'altèrent pas la mesure de plus de $\frac{1}{100}$ de mm ; on estime donc que les cotes peuvent être relevées à $\pm \frac{1}{100}$ de mm.

## 3° Micromètre avec inscription directe de la cote.

Le temps de lecture de la cote sur le palmer est toujours une peu long ; pour rendre la lecture de la cote immédiate, et aussi afin d'éviter l'incertitude relative à l'indication de la cote, des constructeurs ont incorporé un *compte-tours* dans le corps du plamer. Ce compte-tours est commandé par une roue tangente qui engrène avec la vis du micromètre ; il est conçu pour indiquer non seulement le nombre de tours de la vis, mais aussi les centièmes de tour. Si la vis est au pas de 1 mm, l'indication du compte-tours représente l'écartement des touches en centièmes de millimètre (voir *fig.* 7).

Ces micromètres ont des capacités de mesure semblables à celles du palmer.

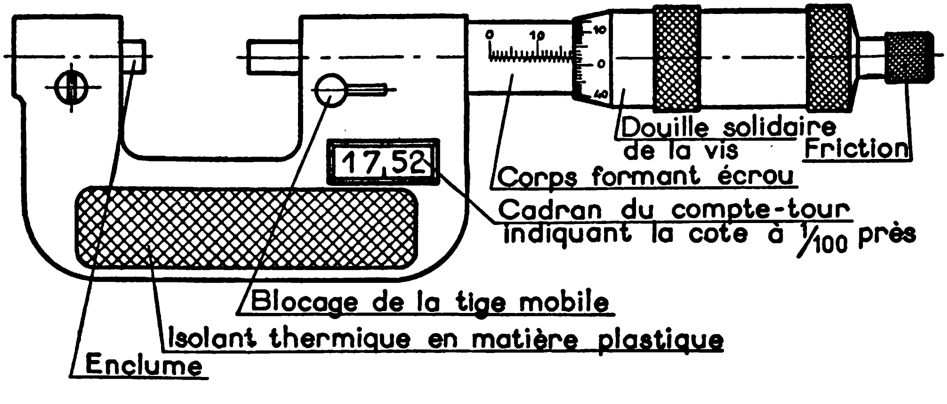



*Fig.* 7. — **Micromètre avec inscription directe de la cote.**

## 4° Micromètre de précision avec comparateur à aiguille incorporé

Cet appareil, appelé parfois **passamètre** (*fig.* 8), permet la mesure des cotes à $\frac{2}{1\,000}$ de mm près. Il est constitué, comme un palmer, d'un corps en forme de C et d'une vis micrométrique. Mais la touche, qui est fixe sur les palmers, est ici mobile et son déplacement peut être enregistré sur un cadran gradué en $\frac{2}{1\,000}$ de mm. L'aiguille qui se déplace devant ce cadran est commandée par la touche mobile, appelée aussi *enclume*, au moyen d'un ensemble de leviers et de roues dentées.

A l'extrémité de la touche mobile, un dispositif permet de régler la position de l'aiguille, notamment au moment de l'étalonnage de l'appareil ; quand la douille est à la position zéro, l'enclume et la touche mobile sont en contact (calibre de l'appareil de 0 à 25) ou au contact de la bague de réglage (calibres de 25 à 50, 50 à 75, etc.) : l'aiguille doit se trouver en face du zéro du cadran.

**Mesure de la cote d'une pièce.**

Pour mesurer la cote d'une pièce, on la place entre les touches du passamètre et on agit ensuite sur la tambour jusqu'à ce que l'aiguille vienne en face du zéro de la graduation. A ce moment, on peut lire la cote comme sur un micromètre ordinaire.

Le système amplificateur à aiguille assurant par ses ressorts une pression constante de l'enclume sur la pièce, il est inutile de se servir du dispositif d'entraînement par friction qui semble avoir été prévu bien inutilement.

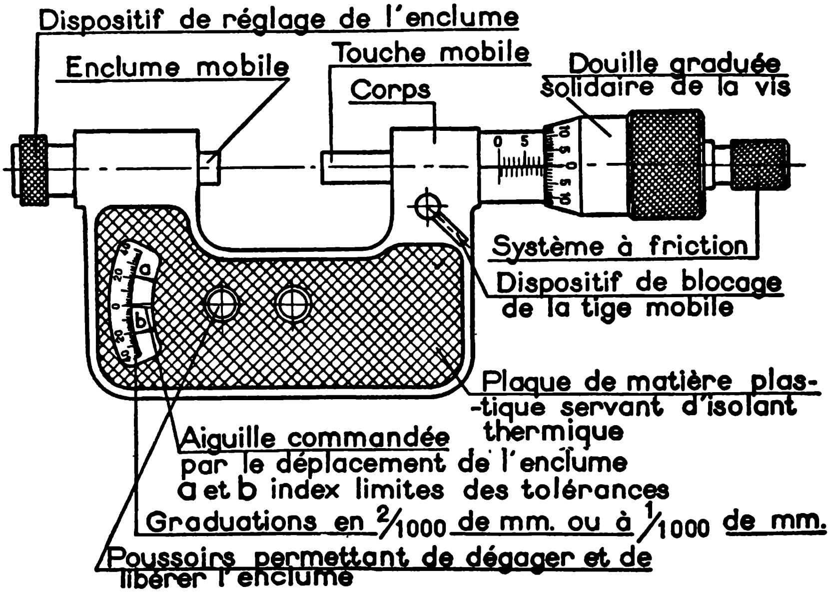



*Fig.* 8. — **Micromètre avec comparateur à aiguille incorporé.**

**Mesure de la différence entre la cote d'une pièce et celle d'un étalon ou d'une pièce type.**

On dispose la pièce type ou l'étalon de mesure entre les touches de l'appareil. En agissant sur la douille, on règle la pression des touches jusqu'à ce que l'aiguille indicatrice vienne en face du zéro du cadran. La touche mobile est alors immobilisée en agissant sur son dispositif de blocage.

On appuie sur le bouton poussoir pour faire reculer l'enclume. Il est possible de dégager l'étalon sans le faire frotter. En disposant la pièce à mesurer entre les touches, on mesure à l'aide de l'aiguille la différence entre la cote de l'étalon et la cote de la pièce. Cette différence est lue en $\frac{2}{1\,000}$ de mm.

## APPAREILS A VIS MICROMÉTRIQUE POUR LA MESURE DES INTÉRIEURS

La mesure des intérieurs est toujours délicate. Elle nécessite un appareillage relativement coûteux si l'on veut effectuer des mesures avec limiteur des actions de contact des touches de l'appareil de mesure et de la pièce à contrôler.

### 1° Jauge micrométrique d'intérieur (*fig.* 9).

Cet appareil est utilisé pour la mesure des alésages. Son expansibilité s'obtient par un système identique à celui du palmer, complété par un ensemble de bague et de tiges de longueurs différentes (mesures permises : 60 à 220 mm environ).

Malheureusement, la jauge micrométrique d'intérieur ne comporte pas de système à friction permettant de régler la pression de l'appareil sur la pièce. La précision des mesures dépend pour beaucoup de l'habileté de l'opérateur.

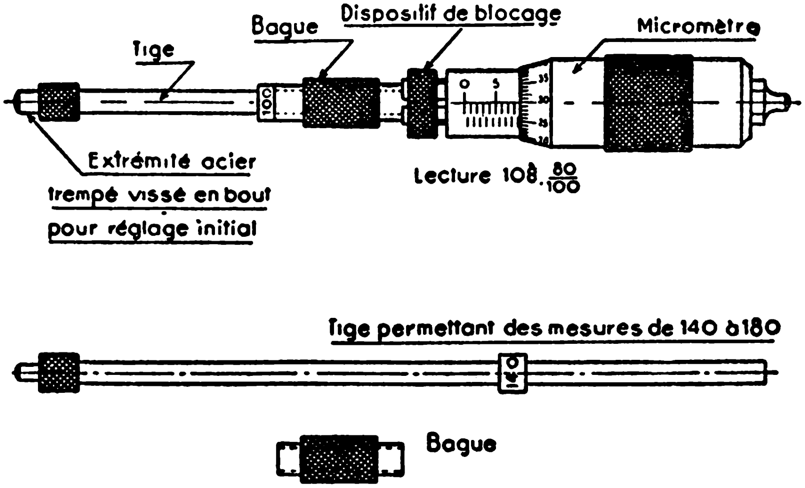



*Fig.* 9. — Jauge micrométrique d'intérieur.

### 2° Micromètre d'alésage.

Ce micromètre (*fig.* 10), conçu spécialement pour la mesure des alésages, comporte une vis micrométrique terminée à une extrémité par une douille graduée comme celle d'un palmer, avec dispositif d'entraînement par friction et, à l'autre extrémité, par une partie conique filetée au pas de la vis micrométrique. Celle-ci, en se déplaçant longitudinalement et en tournant, écarte trois poussoirs disposés à 120°. L'écrou, dont une extrémité est graduée longitudinalement, est terminé par une pièce servant de guide aux trois touches qui se vissent sur la partie conique de la vis.

En faisant avancer ou reculer la vis par la rotation de la douille, on fait écarter ou rentrer les touches. Un ressort de rappel contraint chaque touche à rester sans cesse en contact avec le cône.

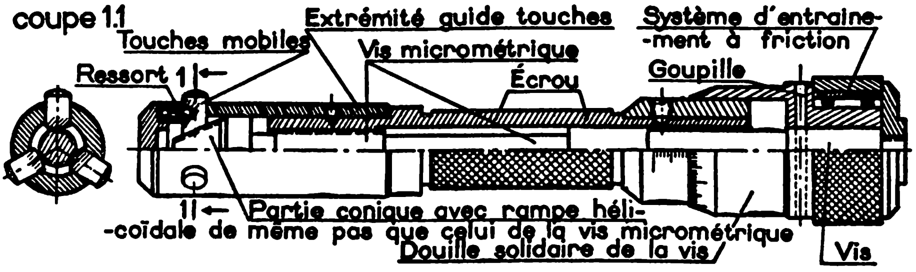



*Fig.* 10. — Micromètre pour la mesure des alésages (« Tésa »).

Ce micromètre a une assez faible amplitude en raison des dimensions nécessairement restreintes du cône : un micromètre permet de mesurer des diamètres dont le plus grand est supérieur au plus petit de 2 à 25 mm (2 mm pour des diamètres de 6 à 12, 10 mm pour des diamètres de 12 à 50, et 25 mm pour des diamètres de 100 à 200). Il est possible de monter sur un même corps plusieurs extrémités guide-touches.

## 3º Micromètre d'intérieur à deux touches.

Basé sur le même principe, il existe un micromètre comportant deux touches diamétralement opposées, poussées le plus souvent par un cône lisse.

Ce micromètre permet, comme le micromètre d'alésage, de mesurer le diamètre des alésages, d'en déterminer les défauts ; mais il rend possible la mesure de l'écartement de deux surfaces planes parallèles.

## 4º Jauges d'intérieur pour rainures profondes.

Il est intéressant de signaler l'existence de jauges d'intérieur, pour alésages ou rainures profondes, dont les branches articulées sont écartées au moyen d'un coin. La *figure* 11 représente une jauge avec coulisseau à vernier se déplaçant sur une règle graduée. Lorsque le coulisseau glisse, les deux branches articulées s'écartent constamment, en raison de l'action de la plaque triangulaire sur les deux tétons disposés à l'extrémité des branches.

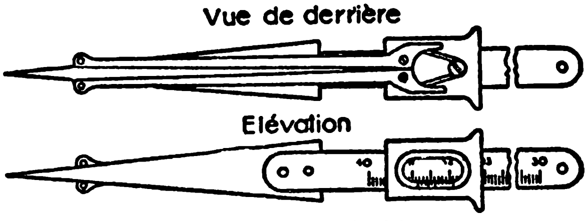



*Fig.* 11. — Jauge d'intérieur.

Il existe des jauges semblables dont le système de commande est une vis micrométrique, et dont le dispositif de lecture de la cote est celui du palmer.

# VÉRIFICATEURS A TOLÉRANCE

Les vérificateurs à tolérance sont employés pour s'assurer que les cotes des pièces exécutées sont bien comprises entre les tolérances prévues sur le dessin. Ils ne doivent pas être utilisés en cours de fabrication, car l'ouvrier qui n'emploierait que des vérificateurs à tolérance travaillerait en aveugle, ne sachant jamais quelle profondeur de passe il faut prendre pour terminer le travail.

## 1° Utilisation des vérificateurs.

Pour faire la vérification des pièces, deux vérificateurs sont nécessaires. L'un d'eux (« *entre* ») classe la pièce comme bonne si l'assemblage de la pièce et du vérificateur est possible *sans forcement* ; c'est le cas du vérificateur du maximum de l'arbre et du vérificateur du minimum de l'alésage.

L'autre (« *n'entre pas* ») classe la pièce comme bonne si l'assemblage de la pièce et du vérificateur n'est pas possible, *du moins sans forcement* ; c'est le cas du vérificateur du minimum de l'arbre et du vérificateur du maximum de l'alésage. En définitive, la dimension d'un élément est considérée comme bonne si l'élément satisfait aux vérifications *faites avec deux vérificateurs*, l'un de la catégorie « *entre* », l'autre de la catégorie « *n'entre pas* », les dimensions étant, pour l'un, la cote maximum et, pour l'autre, la cote minimum ; la différence des cotes représente l'erreur tolérée.

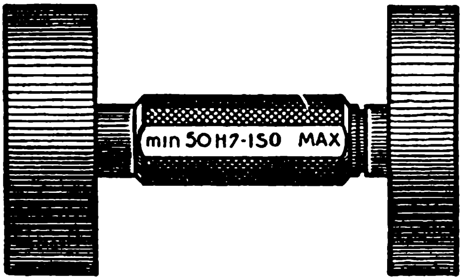


*Fig.* 12. — Tampon double en une seule pièce.

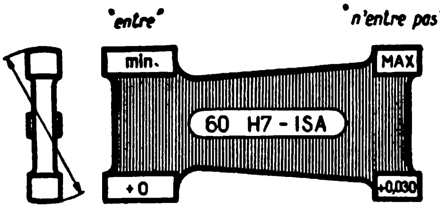


*Fig.* 13. — Jauge plate double.

## 2° Formes des vérificateurs.

Ces vérificateurs sont construits sous les formes suivantes :

### a) *Pour les alésages.*

a) **Tampons doubles** en deux pièces ou en une seule (*fig.* 12) ;

b) **Jauges plates** ne présentant que deux parties cylindriques diamétralement opposées :

Jauges plates doubles à deux côtés (*fig.* 13), pour diamètres allant jusqu'à 100 environ ;

Jauges plates doubles à un seul côté (*fig.* 14) pour diamètres qui excèdent 100.

Jauges plates doubles en deux pièces, de même forme que les jauges plates à un seul côté.

c) **Broches** dont les extrémités appartiennent à la même sphère pour les alésages de grands diamètres :

Broches simples (*fig.* 15), l'une établie à la cote maximum, l'autre à la cote minimum. La partie médiane de ces broches est munie d'une poignée en caoutchouc ou en ébonite pour les protéger contre la chaleur de la main.

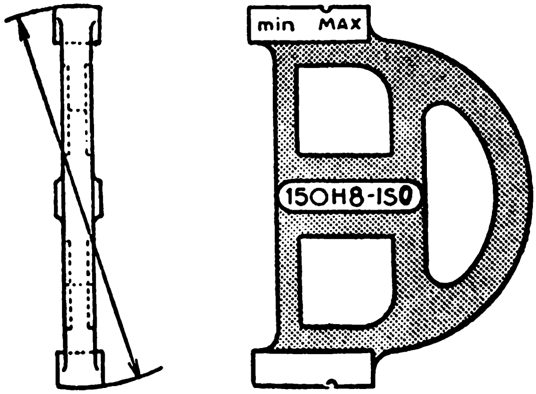



*Fig.* 14. — **Jauge plate double à un seul côté.**

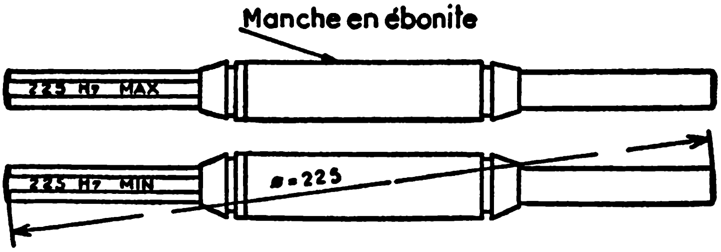



*Fig.* 15. — **Broche simple à bouts sphériques.**

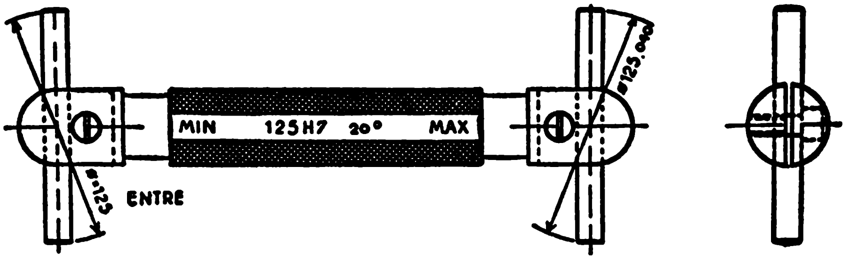



*Fig.* 16. — **Broche double à bouts sphériques.**

Broches doubles (*fig.* 16) : les deux broches d'un même jeu sont réunies par une poignée amovible.
Les broches à bouts sphériques sont construites pour les diamètres supérieurs à 100.

d) **Disque de référence double** (*fig.* 17) à manche amovible, servant à la vérification des calibres-mâchoires. Il existe par calibre un disque maxi, un disque mini et un disque de rebut aorès usage.

***Fig.* 17. — Disque de référence.**

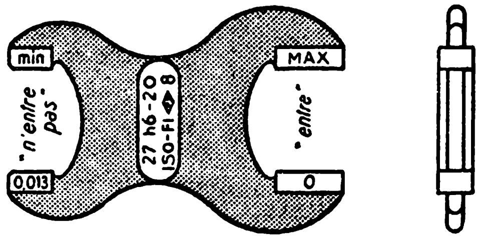



***Fig.* 18. — Calibre-mâchoire double dissymétrique.**

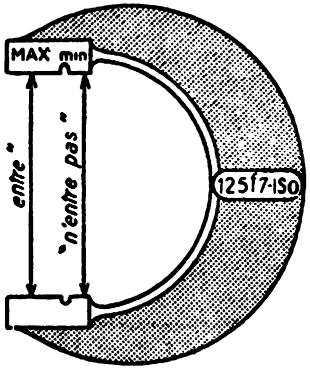



***Fig.* 19. — Calibre-mâchoire avec parties *entre* et *n'entre pas* du même côté.**

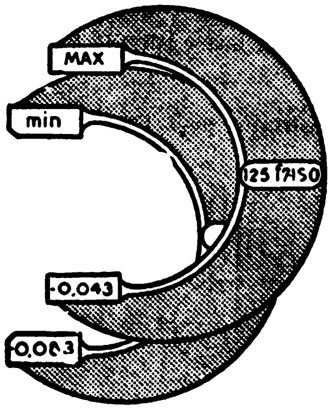



***Fig.* 20. — Calibre-mâchoire en deux pièces.**

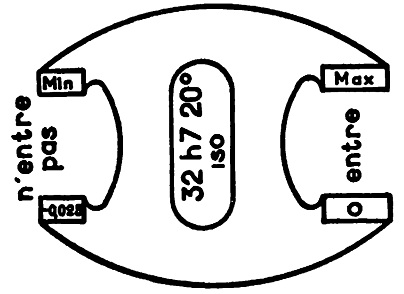



***Fig.* 21. — Calibre-mâchoire dissymétrique rigide.**

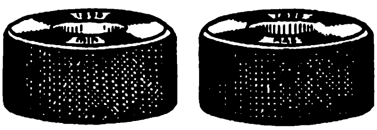


***Fig.* 22. — Bagues lisses ou lunettes.**

## b) *Pour les arbres.*

**a) Calibres-mâchoires, construits sous les formes suivantes :**

**Calibres-mâchoires en une seule pièce à forme dissymétrique, avec parties « *entre* » et « *n'entre pas* » de chaque côté (*fig.* 18), utilisés pour diamètres inférieurs ou égaux à 100;**

Calibres-mâchoires en une seule pièce avec parties « *entre* » et « *n'entre pas* » du même côté (*fig.* 19), pour diamètres supérieurs à 100 ;

Calibres-mâchoires en deux pièces (*fig.* 20), pour diamètres supérieurs à 100.

La forme donnée, en *figure* 18, au calibre-mâchoire en une seule pièce à forme dissymétrique, a été conçue pour faciliter sa manœuvre.
Mais elle a l'inconvénient de rendre chacune des branches très flexible. Aussi a-t-on préféré donner aux vérificateurs davantage de rigidité, plutôt que de les rendre faciles à manipuler. La *figure* 21 indique la forme actuellement donnée aux calibres-mâchoires en une seule pièce à forme dissymétrique.

b) **Bagues ou lunettes** (*fig.* 22).

## 3° Marquage des vérificateurs.

Chaque vérificateur doit comporter **obligatoirement** les indications suivantes :

1° la cote nominale à laquelle il se rapporte ;

2° le symbole de l'élément qu'il est apte à vérifier (lettre ou numéro) ;

3° l'indication « ISO » ;

4° un signe distinctif pour le côté « *entre* » et le côté « *n'entre pas* ».
Cette distinction s'obtient par :
- longueur réduite du côté « *n'entre pas* », se justifiant par le fait qu'il ne peut y avoir usure de contact ;
- léger chanfrein du côté « *n'entre pas* », facilitant la mise en contact avec la pièce et la constatation de l'impossibilité d'engager sans forcer ;

5° la valeur des écarts correspondant aux cotes maxi et mini.

## 4° Fabrication des calibres.

Ils sont exécutés en acier au carbone de première qualité, les uns en acier demi-dur cémenté, les autres en acier dur. Les tampons sont tirés dans la barre, les calibres-mâchoires sont estampés.

### a) *Traitements thermiques et opérations d'usinage.*

*a*) estampage ou tronçonnage des barres,
*b*) recuit de stabilisation,
*c*) dégrossissage à l'outil ou à la meule,
*d*) trempe et revenu, ou cémentation et double trempe,
*e*) stabilisation, 150 heures à 150°,
*f*) rectification,
*g*) stabilisation pendant 24 heures,
*h*) rodage.

On garnit souvent, avant rodage, les parties actives des vérificateurs avec du chrome déposé par voie électrolytique. Le chrome étant un métal très dur, l'usure des calibres est beaucoup plus lente.

On réalise également des calibres avec touches rapportées en carbure de tungstène. La durée de ces vérificateurs est, de ce fait, considérablement augmentée. La *figure* 23 représente un calibre-mâchoire en une seule pièce, avec parties « *entre* » et « *n'entre pas* » du même côté.

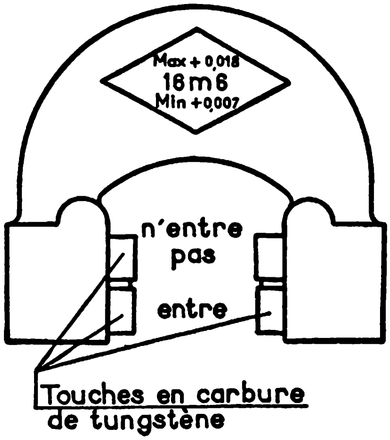



*Fig* 23. — Vérificateur à touches rapportées en carbure de tungstène.

**b) *Vérification des calibres.***

La vérification des calibres se fait, pour les jauges et les tampons, sur le comparateur à amplificateur à aiguille, préalablement étalonné avec des cales étalons, et pour les calibres-mâchoires avec l'appareil Solex ou les disques de référence.

*Le Comité de normalisation a fixé les tolérances d'usinage* pour chaque extrémité maxi et mini des calibres. En outre, pour la partie qui doit entrer, on a fixé une cote d'usure au-delà de laquelle le calibre ne peut plus servir.

Exemple.

Soit un calibre-mâchoire 27 f 7. Le côté maxi qui doit entrer et se trouver à la cote 27 — 0,020 sera usiné à $27^{-21}_{-25}$. Le calibre sera inutilisable lorsque, après usure, la cote du maxi sera de 27 — 0,017. Pour le mini n'entrant pas et où la cote théorique est 27 — 0,40, les tolérances d'usinage sont $27^{-43}_{-39}$.

# MESURE DES COTES PAR LA MÉTHODE DE COMPARAISON

## A. — Principe

On compare la cote de la pièce à celle d'un étalon de dimension égale à la cote nominale à mesurer. A l'aide d'un **comparateur**, on mesure avec une grande précision la différence existant entre la cote de la pièce et celle de l'étalon (voir *fig.* 24).

Désignons par C la cote de la pièce, E la cote de l'étalon et D la différence entre ces deux cotes, mesurée au comparateur.

Si nous tenons compte des incertitudes résultant de la fabrication des étalons et de la mesure de E, nous avons :

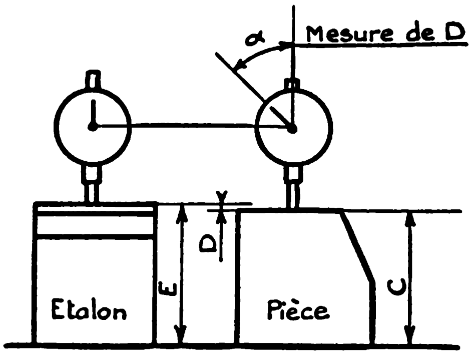
$$C^{\pm x} = E^{\pm e} + D^{\pm d}$$

qui donne : $x = e + d$.

On conçoit que, pour obtenir C avec une précision importante, il faut que C soit le plus petit possible ; *e* et *d* doivent donc être très faibles.

Cela revient à dire que les étalons doivent être exécutés avec des tolérances très réduites, de l'ordre de quelques microns ou fractions de micron.

*Fig.* 24. — Principe d'une mesure par comparaison. ——→




Le comparateur doit être un appareil très précis, et particulièrement fidèle. Sa construction sera soignée et sa pression au contact de la pièce devra être faible et constante d'une mesure à l'autre.

En général, lorsqu'il s'agit d'un comparateur à touche, la pression de contact est donnée par un ressort. Comme on fait agir le comparateur successivement sur l'étalon et la pièce, qui ont sensiblement la même dimension, la flèche du ressort reste la même et, par suite, la pression de contact demeure constante.

## B. — Étude des étalons utilisés pour les mesures des longueurs par comparaison

Les étalons utilisés sont des petits blocs prismatiques d'acier traité appelés **cales étalons.**

Ils sont considérés comme des étalons secondaires de l'étalon primaire, qui est le mètre en platine iridié déposé au pavillon de Breteuil, à Sèvres.

### 1° Description des cales étalons.

Les cales étalons, dites cales Johansson (nom du premier constructeur suédois), sont des petits blocs parallélépipédiques d'acier trempé, rectifiés et ayant subi un vieillissement de plusieurs milliers d'heures avant d'être rodés sur des machines spéciales. Deux faces de chaque cale sont aussi planes et aussi parallèles que possible, leur distance étant celle qu'indique la cote gravée sur la cale. Les cales sont étalonnées à 20° et garanties aux précisions :

1° *Cote* : ± 0,000 1 pour les cales inférieures à 20 mm; ± 0,000 3 pour les cales de 10 à 50 mm ; 0,000 4 pour les cales de 75 à 100 mm.

2° *Parallélisme rigoureux* à moins de $\frac{1}{10000}$ mm.

3° *Plan parfait* à moins de $\frac{1}{10000}$ de mm.

La superposition des cales s'effectue, après nettoyage préalable des faces en contact, *par simple adhérence* due autant à la pression atmosphérique qu'à l'attraction moléculaire (voir *fig.* 25).

La planitude, le parallélisme, la cote se vérifient au moyen du *comparateur Solex*, en utilisant un jeu de cales super-étalon, ou au moyen de *l'interféromètre*, par comparaison avec des glaces optiquement planes.

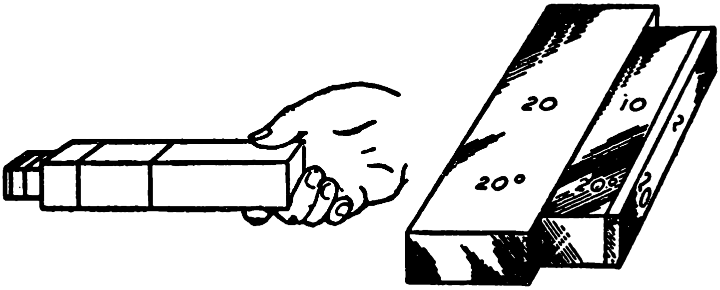



*Fig.* 25. — Cales étalons.

## 2° Les boîtes de cales.

Les cales sont groupées en jeux permettant d'exécuter, par combinaison, les cotes de 1 à 200, avec une différence de $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{200}$ ou $\frac{1}{1000}$ de mm.

Voici par exemple la composition d'un jeu de 122 cales :

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | cales | progression | 0,001 | Dimensions | 0,990 | à | 1,009 |
| 45 | — | — | 0,01 | — | 1,01 | à | 1,49 |
| 10 | — | — | 0,1 | — | 1 | à | 1,9 |
| 38 | — | — | 0,5 | — | 0,5 | à | 19,5 |
| 9 | — | — | 10 | — | 20 | à | 100 |

Pour permettre l'application des cales à la vérification du traçage de précision et à la mesure des alésages, des accessoires divers ont été prévus :

Bec à centrer (*fig.* 26).

Bec à tracer (*fig.* 27).

Becs pour mesure des alésages (*fig.* 28).

Monture spéciale (*fig.* 29).

Socle de trusquin (*fig.* 30).

Au moyen de ces accessoires, on peut réaliser un trusquin de précision (*fig.* 31) ou un ensemble permettant de mesurer les alésages (*fig.* 32).

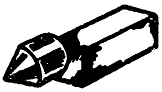


*Fig.* 26. — Bec à centrer.

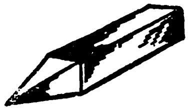


*Fig.* 27. — Bec à tracer.

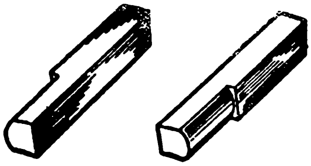


*Fig.* 28. — Becs pour mesure des alésages.

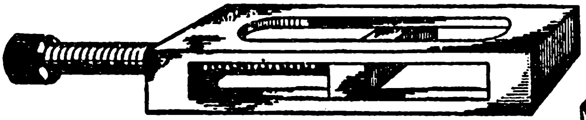


*Fig.* 29. — Monture.

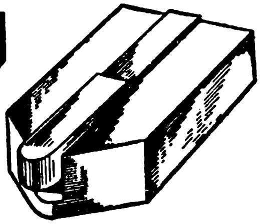


*Fig.* 30. — Socle de trusquin.

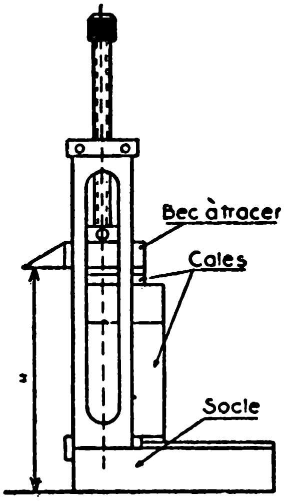



*Fig.* 31. — Trusquin de précision.

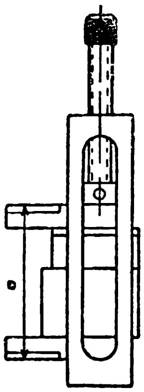


*Fig.* 32. — Ensemble pour la mesure des alésages.

## 3° Applications des cales.

### a) *Étalonnage et vérification d'appareils de mesure à dimensions variables.*

Pieds à coulisse, palmers, jauges micrométriques et comparateurs.

L'utilisation rationnelle de ces appareils impose d'ailleurs leur emploi, non pour effectuer une mesure directe, mais pour relever une dimension à laquelle on comparera une combinaison de cales.

### b) *Vérification des calibres à tolérance.*

Applications aux calibres-mâchoires (fig. 33).

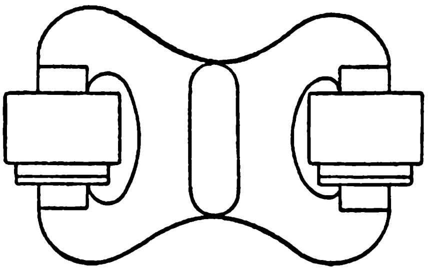


***Fig.* 33. — Vérification d'un calibre-mâchoire.**

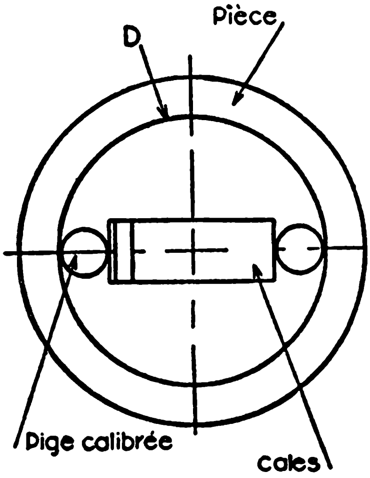



***Fig.* 34. — Mesure du diamètre d'une bague.**

### c) *Vérification des cotes des pièces et des montages d'usinage.*

Exemple : Mesure du diamètre d'une bague (*fig.* 34).

**Principe.**

*a*) On règle le comparateur amplificateur (*fig.* 50 et 51) à la cote D à obtenir, en passant entre ses touches la combinaison de cales correspondant à la cote exacte D.

*b*) On mesure la pièce par combinaison de cales et cylindres rectifiés.

*c*) On mesure cette combinaison sur le comparateur et on lit l'erreur commise.

### d) *Réglage précis du déplacement des chariots des machines-outils.*

Par suite de l'usure des vis et des écrous, des jeux se produisent ; on ne peut donc se fier aux indications des tambours gradués des manivelles pour obtenir un déplacement précis. Dans l'exemple de la *figure* 35, on voit que l'exécution de l'épaulement de hauteur *a* est facilement réalisable par l'interposition de la cale d'épaisseur *a* entre la butée A et le comparateur C.

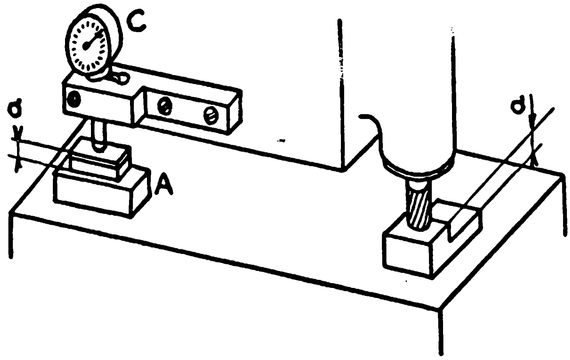



*Fig.* 35. — Réglage du déplacement des chariots des machines-outils.

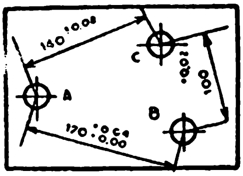



*Fig.* 36. — Pièce à percer.

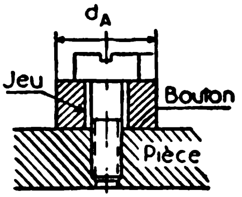



*Fig.* 37. — Bouton.

## e) *Réglage des pièces en vue de certaines opérations d'usinage.*

Exemple : Perçage par la méthode des boutons (*fig.* 36 et 37).

Pour exécuter le perçage des 3 trous A, B, C avec précision, il faut :

- Effectuer le tracé avec le trusquin, la pointe à tracer et le compas.
- Percer des trous en A, B, C, puis les tarauder pour y fixer des *boutons* (rondelles rectifiées extérieurement à une cote précise).
- Serrer des boutons en A, B, C, et régler leur écartement à l'aide de combinaisons de cales.

  *Exemple* : si $d_A = 28{,}3$ et $d_B = 28{,}42$, entre les boutons A et B il faudra passer une combinaison de cales égale à

$$170{,}02 - \frac{28{,}3 + 28{,}42}{2} = 141{,}66.$$

- Monter la pièce sur un tour ou une fraiseuse, et centrer le bouton A à l'aide d'un comparateur.
- Enlever le bouton, percer, puis aléser à l'outil.
- Déplacer la pièce et effectuer l'usinage des trous B, puis C, de la même façon.

**f) *Vérification du profil des pièces et des calibres au banc-microscope* (fig. 38 et 39).**

L'appareil comprend un microscope (grossissement 65 fois) à axe vertical comportant deux traits perpendiculaires gravés, indispensables aux visées sur un point déterminé.

La pièce est fixée sur un ensemble de deux chariots permettant le déplacement suivant deux directions perpendiculaires. La course des chariots se mesure à l'aide de combinaisons de calcs disposées en butée, comme il est indiqué sur la *figure* 38.

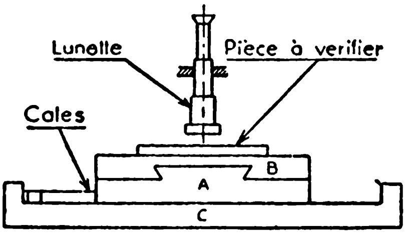



*Fig.* 38. — Banc-microscope.

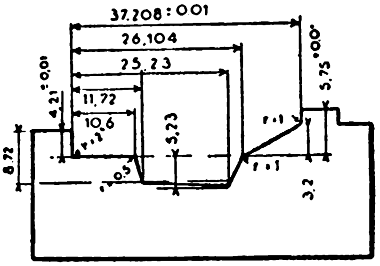



*Fig.* 39. — **Calibre à vérifier au banc-microscope.**

Pour la mesure des angles, le microscope est muni d'une plaque graduée en degrés et fractions de degré ; les divisions apparaissent, dans la lunette, espacées de 2 mm environ. Cette plaque peut tourner autour de l'axe de la lunette, permettant ainsi la mesure directe des angles. Le microscope permet, en outre, de se rendre compte des imperfections d'usinage.

# APPAREILS DE COMPARAISON

## A. — Généralités

Les **comparateurs** ou **amplificateurs** enregistrent les différences de cotes entre les différents points d'une pièce ou entre les pièces à mesurer et les étalons (pièces types ou combinaisons de cales).

Tous ces appareils sont conçus pour amplifier les différences de cotes par des procédés mécaniques, pneumatiques ou optiques.

La précision et la sensibilité de ces appareils dépend pour beaucoup de la constance et du peu d'intensité de la pression qu'exerce leur touche mobile sur la pièce à mesurer. Dans certains appareils optiques (interféromètres) et pneumatiques, les erreurs pouvant provenir des déformations dues à la pression de contact se trouvent éliminées, puisque la mesure se fait sans que la pièce touche la partie active du comparateur.

Nous limiterons notre étude aux **comparateurs à amplification mécanique.**

# B. — Comparateurs à amplification mécanique

## 1° Principes.

L'amplification des différences de cotes est obtenue :

a) **Par l'action d'une crémaillère agissant sur un ensemble de roues dentées**, comme dans le comparateur à cadran (*fig.* 41).

b) **Au moyen de systèmes de leviers à bras inégaux :** Comparateurs à aiguille (voir *fig.* 48 et 49).

Principe de ces comparateurs (*fig.* 40) :

Si $\frac{OA}{OB} = \frac{O'A'}{O'B'} = \frac{O''A''}{O''B''} = \frac{1}{10}$, un déplacement de 1 mm de l'aiguille correspond à une levée de la touche C de $\frac{1}{1000}$ de mm.

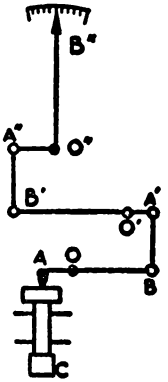



*Fig.* 40. — Schéma de principe d'un amplificateur à levier.

c) **Par l'action combinée de leviers et roues dentées** : comparateur à cadran de précision (voir *fig.* 41).

d) **En utilisant le déplacement d'une vis micrométrique** dont l'angle de rotation est mesuré par un tambour gradué, de grand diamètre, avec vernier. Ce principe est appliqué dans la construction du comparateur d'atelier et du comparateur à amplification micrométrique (*fig.* 50 et 51).

## 2° Comparateur à cadran.

### a) *Description.*

Il a la forme d'une grosse montre ; l'aiguille commandée par le palpeur fait un tour pour une différence de cote de 1 mm. Le cadran étant divisé en 100 parties égales, il est donc possible d'apprécier le $\frac{1}{100}$ de mm.

Le schéma de principe est donné par la *figure* 41.

Lorsque la crémaillère se soulève de 1 mm, les roues Z et $Z_1$, montées sur le même axe, font $\frac{1}{10}$ de tour puisque la crémaillère est au pas de 1 et que la roue Z porte 10 dents.

Le nombre de tours dont a tourné $Z_2'$, que porte l'aiguille centrale, est donné par la relation :

$$\frac{\alpha}{\frac{1}{10}} = \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1' \times Z_2'} = \frac{32 \times 25}{8 \times 10} = 10\,d \quad \text{ou} \quad \alpha = \frac{1}{10} \times 10 = 1 \text{ tour.}$$

La petite aiguille indique le nombre de tours de la grande aiguille.

L'ensemble de la graduation qui est teinté en gris peut tourner autour de l'axe de la montre, afin que la division zéro puisse être mise à volonté devant l'aiguille centrale.

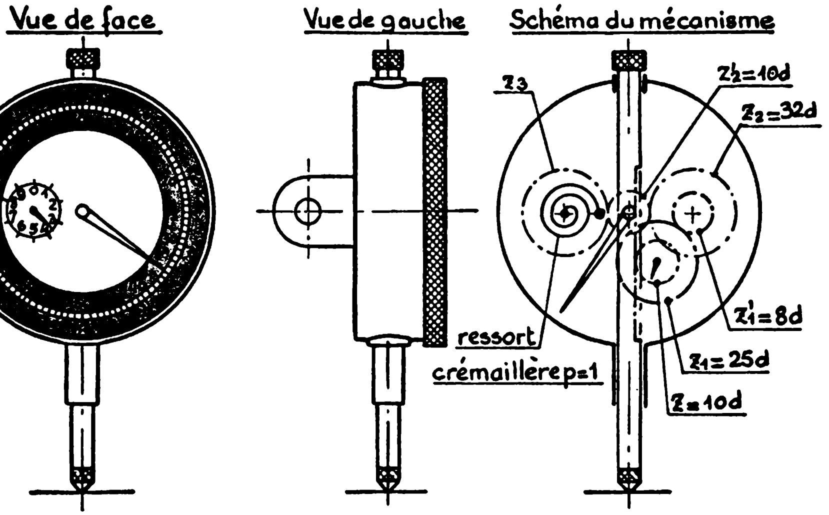



*Fig.* 41. — Schéma de principe du comparateur à cadran.

Il existe également des comparateurs à cadran permettant d'apprécier le $\frac{1}{1000}$ de mm.

## b) *Utilisation.*

Le comparateur est très employé dans les ateliers de mécanique, car il permet :

a) **La vérification des pièces.**

Des supports spéciaux peuvent recevoir la montre du comparateur :

- *Support universel* (*fig.* 42) permettant d'orienter le comparateur dans toutes les directions ;
- *Support pour vérification des rainures* (*fig.* 43) ;
- *Support pour vérification des alésages* (*fig.* 44).

La base du support comprend trois touches, deux fixes et une mobile, qui transmettent les variations de cotes au palpeur par l'intermédiaire de leviers.

Pour effectuer la mesure, on incline l'appareil suivant OY et OY' ; l'écart minimum enregistré correspond à la cote prise suivant un diamètre.

b) **La vérification du montage des outillages sur les machines** (voir *fig.* 45).

c) **La vérification du montage des pièces sur les machines** (voir *fig.* 46).

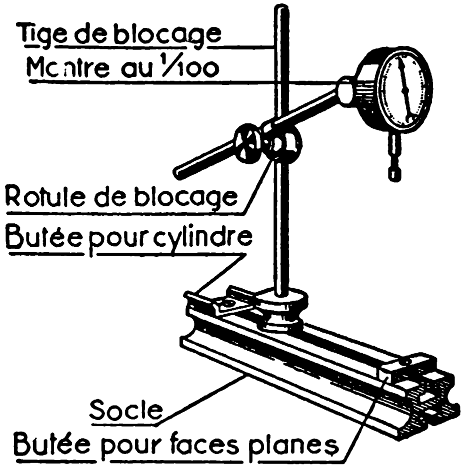
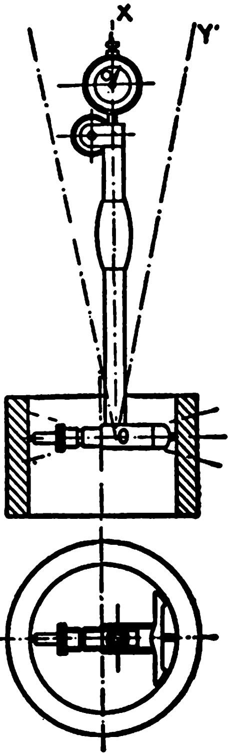
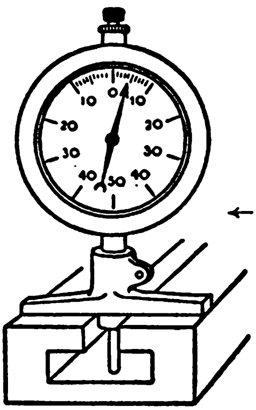



*Fig.* 42. — **Support universel de comparateur.**



← *Fig.* 43. — **Support pour vérification des rainures.**

*Fig.* 44. — **Support pour vérification des alésages.**

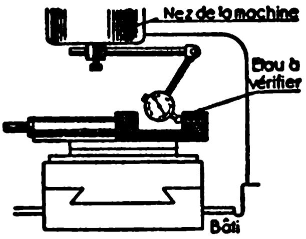



*Fig.* 45. — **Mise en place d'un étau de fraiseuse.**

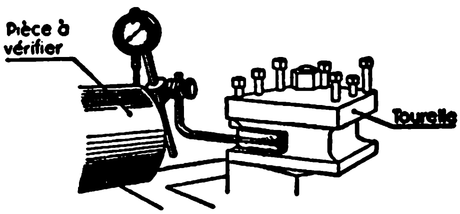



*Fig.* 46. — **Centrage d'une pièce au tour.**

**d) La vérification géométrique des machines au montage et à la réception** (voir *fig.* 47).

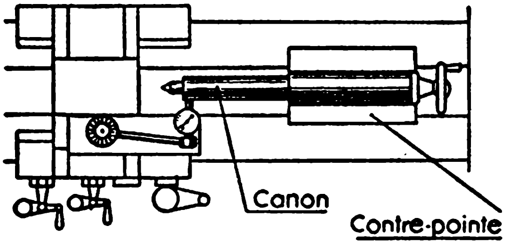



***Fig.* 47. — Vérification du parallélisme du canon de la contre-pointe avec les glissières.**

## 3° Comparateurs de haute précision.

**Les comparateurs de haute précision, appelés aussi comparateurs à aiguille, permettent des amplifications de 500, 1 000 ou 2 000.**

**La *figure* 48 représente un comparateur au $\frac{1}{2000}$ de la *Précision mécanique*, dont le fonctionnement est basé sur le principe de la multiplication des déplacements au moyen de levier. Le comparateur de la S. I. P. (*Société genevoise des Instruments de physique*), représenté sur la *figure* 49, est fondé sur le principe de l'amplification des déplacements par la combinaison d'engrenages et leviers. La touche terminée par un cadre exerce une action excentrée sur le secteur denté. La rotation de ce secteur autour de son axe d'articulation met en mouvement un petit pignon solidaire de l'aiguille. Un ressort à boudin assure une pression sur la pièce de 60 à 120 g. Un ressort spirale sert à rattraper les jeux. Une division du cadran correspond à 0,001 mm.**

## 4° Comparateur d'atelier au $\frac{1}{1000}$ de mm (*fig.* 50).

**Ce comparateur, utilisé pour la mesure des pièces, le contrôle et le réglage des appareils de mesure, comporte une vis micrométrique au pas de 1 mm garanti au $\frac{1}{1000}$ de mm. Le barillet, gradué en 100 parties égales, présente un diamètre tel que l'écartement entre les divisions est de 2 mm environ. Le vernier pour la lecture au $\frac{1}{1000}$ est déplaçable à la main pour remise à zéro.**

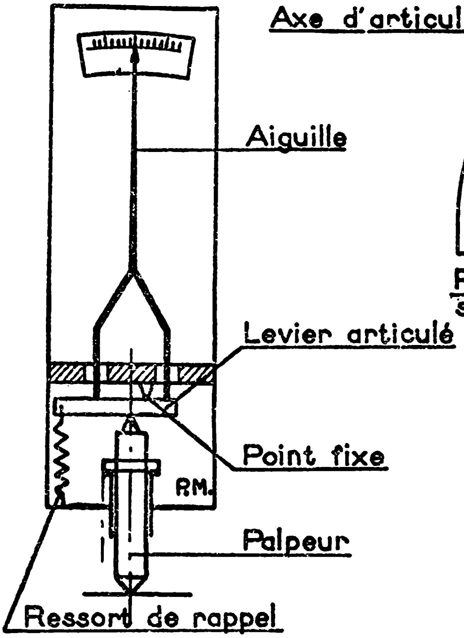



*Fig.* 48. — Micromètre de haute précision (type *Précision mécanique* au $\frac{1}{2\,000}$).

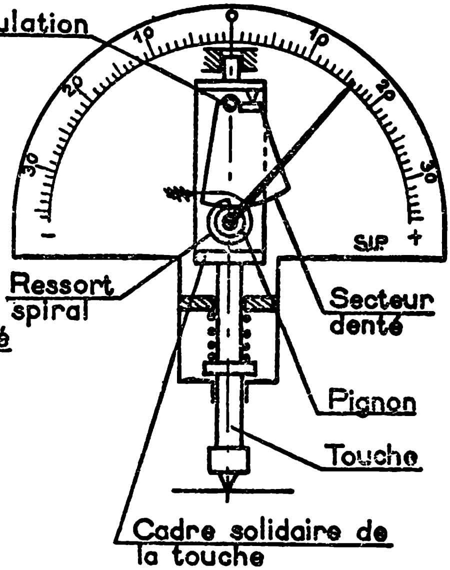



*Fig.* 49. — **Micromètre de haute précision (type *Société genevoise des Instruments de physique*).**

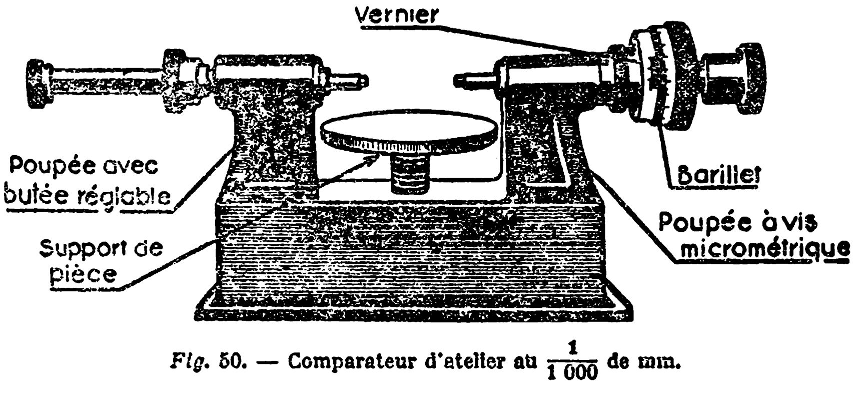



*Fig.* 50. — **Comparateur d'atelier au $\frac{1}{1\,000}$ de mm.**

## 5° Comparateur de contrôle à amplification micrométrique (*fig.* 51).

C'est un appareil de haute précision permettant des mesures de laboratoire au $\frac{1}{1\,000}$ de mm.

### a) *Description.*

La poupée B supporte un comparateur à aiguille E dont le but est de maintenir constante la pression sur les pièces à mesurer (mesure indépendante de l'opérateur). La poupée peut être déplacée pour la mise au zéro au moyen d'une vis de réglage commandée par un bouton molette P. La poupée C contient la vis micrométrique solidaire du tambour gradué, de telle sorte qu'une division corresponde à un déplacement de la touche de $\frac{1}{1\,000}$ de mm. La touche se déplace sans tourner.

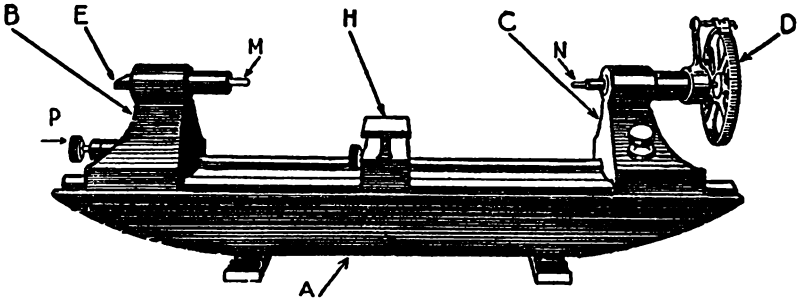



*Fig.* 51. — Comparateur à amplification micrométrique.

A : Banc parfaitement dressé. — B : Poupée mobile. — C : Poupée mobile avec vis micrométrique. — D : Tambour divisé en $\frac{1}{1\,000}$ de mm. — E Amplificateur à aiguille gradué en $\frac{1}{1\,000}$ de mm. Indicateur de contact. — H : Support de pièce.

### b) *Utilisation.*

**Principe d'une mesure.**

Régler avec les cales étalons l'écartement entre M et N, l'aiguille du comparateur à aiguille étant en face de la division zéro.

Passer la pièce entre M et N.

Ramener l'aiguille du comparateur à zéro en agissant sur la touche N par l'intermédiaire du tambour gradué.

Lire sur le tambour D la différence des cotes de la pièce et de la combinaison de cales étalons.

# Vérification des surfaces

Les pièces qui constituent les ensembles mécaniques sont limitées par des surfaces dont certaines sont obtenues par usinage. Ces surfaces ont des propriétés que la géométrie a particulièrement bien définies.

Ce sont :

— des surfaces planes ;

— des surfaces de révolution : cylindre, cône, sphère, tore ;

— des surfaces cylindriques : par exemple les flancs des dents d'engrenage ;

— des surfaces hélicoïdales : par exemple, hélicoïde réglé limitant les filets de vis.

Les surfaces usinées contiennent nécessairement les trajectoires des différents points de la partie active de l'outil, trajectoires qui reproduisent évidemment les guides des mouvements de coupe et d'avances. On conçoit aisément que la grande majorité des surfaces usinées contiennent des lignes bien connues : la droite, la circonférence, l'hélice (combinaison d'une rotation et d'une translation), la développante de cercle, etc.

## A. — Définition des surfaces usinées

La géométrie définit, le plus souvent, les surfaces par leur mode de génération.

En voici quelques exemples :

— Un plan est la surface engendrée par une droite qui se déplace parallèlement à elle-même, en restant appuyée sur une droite fixe (*fig.* 1).

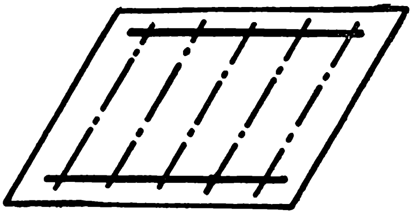


*Fig.* 1. — Génération du plan.

— Une surface cylindrique (*fig.* 2) est engendrée par une droite (génératrice) se déplaçant parallèlement à elle-même, en restant appuyée sur une courbe plane (directrice).

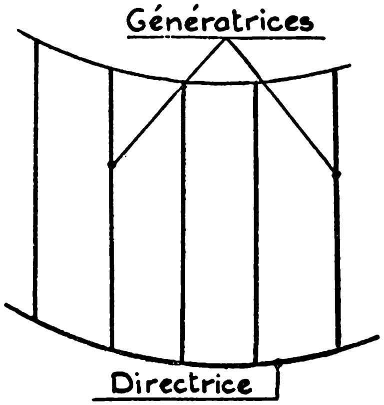



*Fig.* 2. — Génération du cylindre.

— Un hélicoïde réglé est la surface engendrée par une droite qui se déplace en s'appuyant à la fois sur une hélice tracée sur un cylindre et sur l'axe du cylindre, en faisant avec cet axe un angle constant (*fig.* 3).

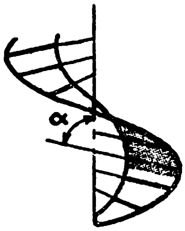



*Fig.* 3. — Génération de l'hélicoïde réglé.

## B. — Propriétés géométriques des surfaces

Les surfaces ainsi définies possèdent des propriétés intéressantes à connaître, car elles permettent d'imaginer des méthodes de vérification.

Citons-en quelques-unes qui intéressent, par exemple, le plan, puis le cylindre.

### 1° Propriétés géométriques relatives au plan.

1. Une droite qui a deux points communs avec un plan est tout entière contenue dans ce plan.
2. Par deux droites concourantes ou parallèles, on peut faire passer un plan et un seul.
3. Si deux plans ont trois points communs, ils sont confondus.
4. Deux plans parallèles sont équidistants.
5. Les intersections d'un plan par des plans parallèles sont des droites parallèles.

### 2° Propriétés géométriques relatives au cylindre de révolution.

1. L'intersection d'un cylindre de résolution par un plan passant par son axe est constituée par deux droites parallèles.
2. Si l'on coupe un cylindre par des plans perpendiculaires à son axe, on obtient des circonférences de même diamètre.

## C. — Méthodes générales de vérification des surfaces

Une surface usinée ne peut être parfaite. Elle présente des défauts de très petite amplitude, correspondant aux sillons laissés par l'outil : ce sont les *défauts microgéométriques* qui caractérisent « l'état de la surface ».

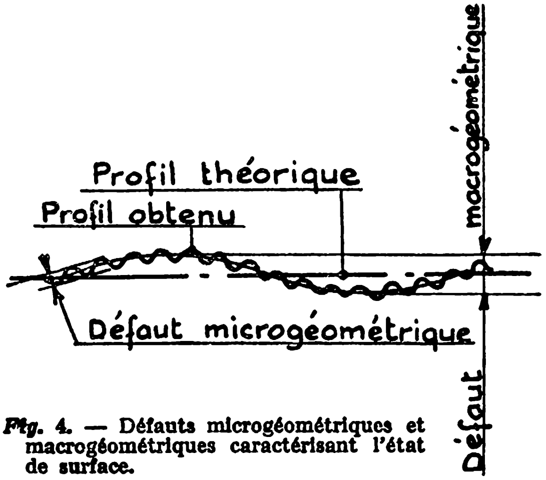



**Fig. 4. — Défauts microgéométriques et macrogéométriques caractérisant l'état de surface.**

Sa forme générale peut être altérée par des défauts de plus grande amplitude, intéressant des portions de surfaces supérieures au millimètre carré : ce sont les *défauts macrogéométriques* (*fig.* 4).

La surface peut être caractérisée par ses dimensions assorties de tolérances. Sur la pièce, sa position, par rapport à d'autres surfaces ou lignes, peut être précisée par des cotes et tolérances de position de surface (*fig.* 5).

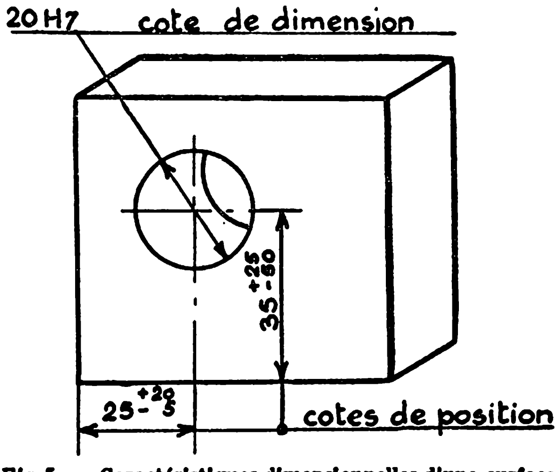



**Fig. 5. — Caractéristiques dimensionnelles d'une surface.**

On admet généralement que : vérifier une surface consiste à s'assurer de l'importance des défauts macrogéométriques et de l'exactitude de ses dimensions.

Contrôler l'état de la surface et vérifier sa position constituent des opérations complémentaires.

La détermination des défauts macrogéométriques nécessite la comparaison de la surface à contrôler avec une *surface étalon.*

a) *La surface étalon peut être réelle* : elle est exécutée avec une précision bien supérieure à la précision recherchée et sera conçue pour permettre le contact avec la surface à vérifier. *Exemples* : marbre plan ; bague ou tampon conique, etc. Le frottement permet de mettre en évidence des points de contact des deux surfaces, en raison de la modification localisée des états de surface et, par suite, de leur aspect.

Ces surfaces étalons permettent, non seulement le contrôle des surfaces terminées, mais aussi des surfaces en cours d'usinage.

b) *La surface étalon*, de même nature que la surface à contrôler, *peut être fictive* : elle représente la surface idéale par rapport à laquelle on situe la surface de la pièce à vérifier : coïncidence ou parallélisme. Le contrôle a pour objet la mesure, en chaque point de la surface usinée, de sa distance à la surface idéale.

Exemple :

— Vérification d'un plan à l'aide d'un niveau : la surface étalon est ici un plan horizontal fictif (*fig.* 6).

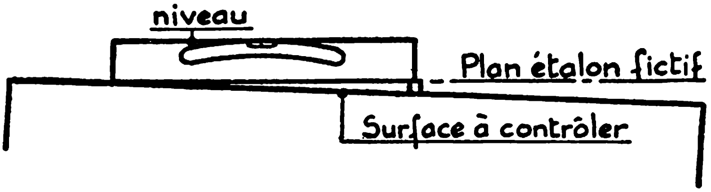



*Fig.* 6. — Vérification d'une surface à l'aide d'un niveau.

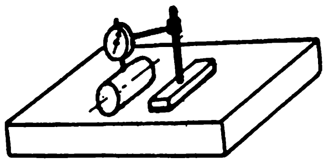


*Fig.* 7. — Vérification d'une surface cylindrique au comparateur.

— Vérification d'un cylindre que l'on a couché sur un marbre plan pour s'assurer, au comparateur, de la rectitude des génératrices et de la qualité des directrices circulaires (*fig.* 7).

La surface fictive est le cylindre idéal, couché sur le marbre, ayant un diamètre égal à la cote nominale. On mesure, avec le comparateur, la différence existant entre les cotes de la pièce cylindrique et celles du cylindre fictif.

Cette méthode de contrôle consiste à s'assurer si la surface usinée a les propriétés géométriques de la surface idéale ; elle fait nécessairement appel à des instruments de mesure et généralement à une surface étalon réelle auxiliaire : la **surface plane** est le plus souvent choisie (marbre, règles glissières des machines).

## SURFACE ÉTALON PLANE

La surface étalon plane est généralement rectangulaire.

Quand le rectangle a une largeur égalant environ les deux tiers de la longueur, l'étalon plan porte le nom de *marbre*. Si le rectangle est étroit, il porte le nom de *règle*.

Les qualités essentielles de ces étalons plans sont : leur grande précision, leur rigidité, leur indéformabilité dans le temps et leur résistance à l'usure.

*a*) La grande précision a été rendue possible en raison de la facilité du contrôle des étalons plans, en cours et en fin de fabrication. Ce contrôle est fondé sur le théorème de la géométrie dans l'espace :

*Si trois surfaces peuvent indifféremment coincïder dans toutes les positions, ces trois surfaces sont planes.*

La *figure* 8 illustre ce principe.

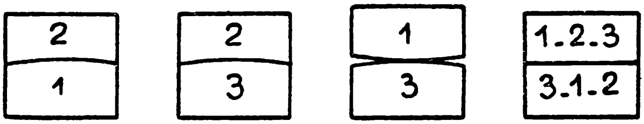



*Fig.* 8. — Contrôle de trois marbres en cours d'usinage.

Les marbres sont usinés par trois et terminés par rodage les uns sur les autres. La vérification se fait par contacts successifs. Les marbres sont très légèrement enduits avec une huile colorée au bleu de Prusse. Les surfaces sont frottées, d'un mouvement louvoyant (suivant un 8). Les zones de contact apparaissent brillantes et entourées de colorant.

Le contrôle définitif se fait au niveau et permet de chiffrer la précision d'exécution.

Les erreurs de forme généralement admises pour les marbres de qualité ont pour valeur maximum :

$$e = \pm \left(0{,}001 + \frac{L}{250\,000}\right).$$

L représente la dimension considérée en mm

*e* est exprimée en mm.

Ainsi, pour L = 1 000 mm, on a :

$$e = \pm \left(0{,}001 + \frac{1\,000}{250\,000}\right) = \pm\ 0{,}005 \text{ mm}$$

$$e = \pm\ 5\,\mu.$$

Cela signifie que tous les points d'un marbre ayant 1 000 mm de longueur doivent être compris entre deux plans parallèles, espacés de : 0,005 × 2 = 0,01 mm. Si l'on examine un élément de marbre de 100 mm de côté, l'erreur sera de :

$$e_1 = \pm \left(0{,}001 + \frac{100}{250\,000}\right) = \pm\ 0{,}0014 \text{ mm}.$$

Tous les points de cet élément de surface doivent être situés entre deux plans distants de : 0,0014 × 2 = 0,003 mm.

Les valeurs trouvées représentent les limites extrêmes de réception. La précision réalisée au cours de la fabrication est souvent beaucoup plus grande.

*b*) Les qualités de rigidité, d'indéformabilité, de résistance à l'usure ont conduit à adopter :

— soit des produits naturels, pratiquement indéformables dans le temps comme le *granit* ;

— soit des produits artificiels coulés qui peuvent donner, avec le moindre poids, le maximum de rigidité, comme la *fonte* ;

— soit des produits artificiels moulés, comme l'*alumine cristallisée*, agglomérée par de la céramique.

## 1° Marbres et règles étalons en granit.

Le granit noir utilisé a subi, pendant des millions d'années, un vieillissement naturel qui a eu pour effet de supprimer toutes les tensions internes. Il conserve pratiquement sa forme exacte.

Les marbres et les règles sont taillés dans des blocs de granit homogènes ; leur rigidité résulte de leur épaisseur : 100 mm pour une longueur de 500 mm, 180 mm pour une longueur de 1 000 mm.

Le granit résiste parfaitement à l'usure et il n'est nullement altéré par l'oxydation.

Les marbres en granit de grande dimension sont généralement montés sur trois pieds en fonte (*fig.* 9).

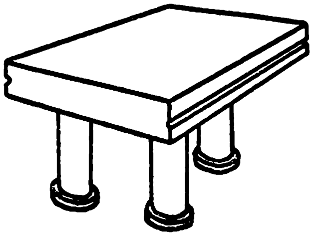


*Fig.* 9. — Marbre étalon en granit.

## 2° Marbres et règles étalons métalliques.

On choisit, le plus souvent, pour leur fabrication, la fonte grise qui donne, à la coulée, des pièces de dureté homogène, dont l'usinage de finition est relativement aisé.

Les marbres et les règles doivent leur rigidité à leur forme : grande hauteur et nervures nombreuses, judicieusement réparties.

Après usinage d'ébauche, les pièces sont stabilisées dans un four porté à la température de 400 à 450°. Elles y restent plusieurs jours et sont refroidies très lentement (chute de température : 20° par heure). Les marbres sont posés sur trois appuis et, pour éviter que des actions de contact déformantes prennent naissance au droit des appuis, on adopte souvent le montage sur billes, préconisé par

M. Cayère (*fig.* 10). Le premier appui est un cône, le second un plan, et le troisième une rainure circulaire en V, dont le centre est situé sur l'axe de l'appui conique.

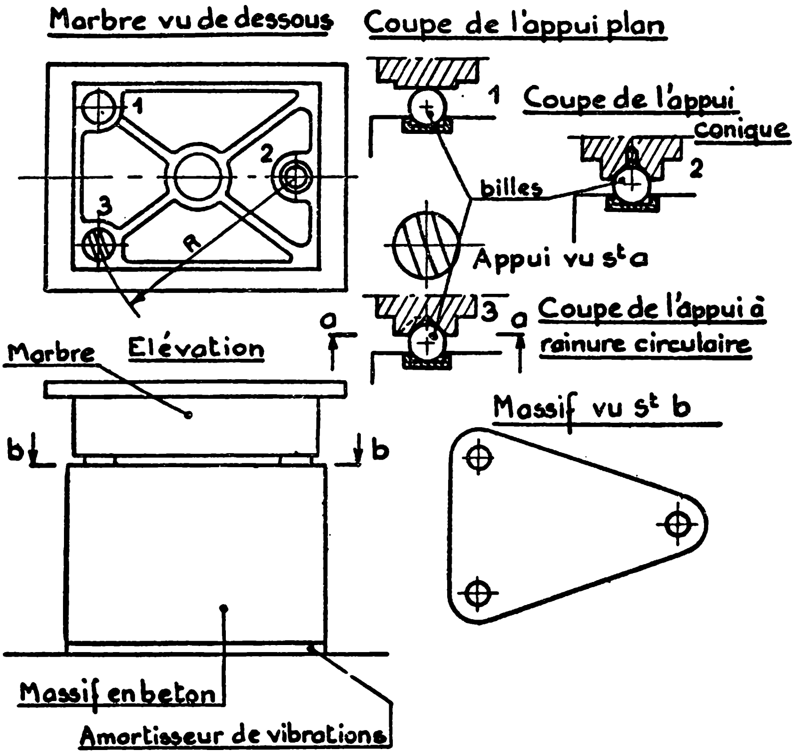



***Fig.* 10. — Montage, sur billes, d'un marbre en fonte sur son support.**

Les billes sont placées dans des cages à fond plat, noyées dans un bloc triangulaire de béton reposant sur un amortisseur en feutre ou caoutchouc : ainsi le marbre est isolé des vibrations du sol de l'atelier.

## 3° Règles à dresser.

Les règles à dresser doivent avoir les qualités suivantes :

— être facilement manœuvrables : elles seront donc légères ;

— être peu déformables sous l'action de leur propre poids : elles seront donc rigides.

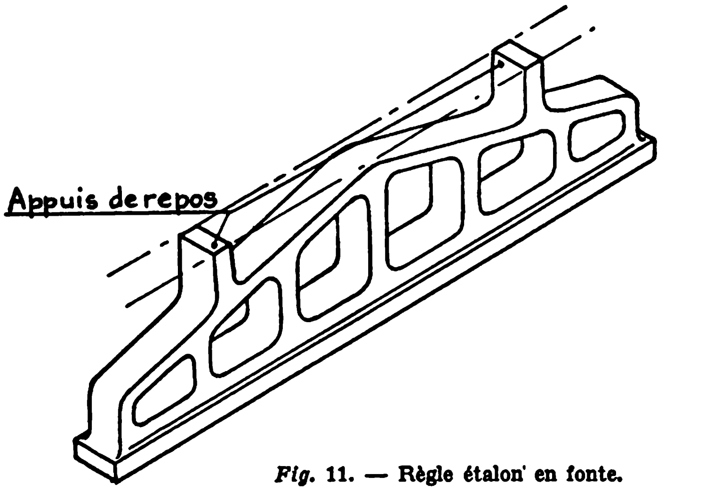



*Fig.* 11. — **Règle étalon en fonte.**

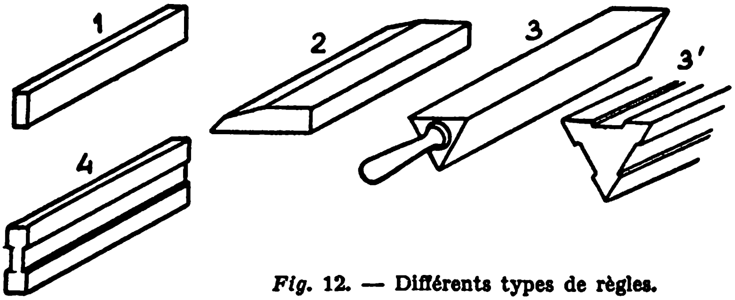



*Fig.* 12. — **Différents types de règles.**

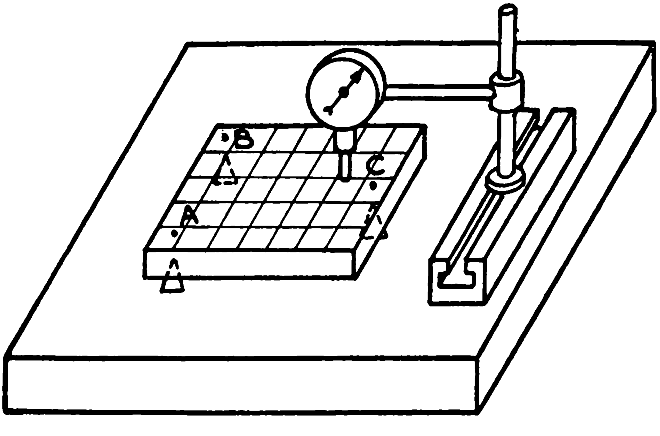



*Fig.* 13. — **Contrôle d'une surface plane au comparateur.**

Pour associer les qualités de légèreté et de rigidité, on donne aux règles à dresser une forme en double trapèze et une section en I évidé de grande hauteur (*fig.* 11).

On est arrivé ainsi à construire une règle d'une masse de 9 kg, qui prend seulement une flèche de 4 $\mu$ lorsqu'elle est appuyée à ses deux extrémités, distantes de 1 mètre.

Ces règles à dresser, qui servent à vérifier des surfaces planes de grande dimension, peuvent avoir des longueurs atteignant 2 mètres.

Pour le contrôle des plans de plus petites dimensions, on utilise des règles en acier ; la *figure* 12 en donne quelques modèles.

L'acier utilisé est un acier qui a été trempé avant usinage de finition et stabilisé au four par un séjour prolongé à 150 ou 200°.

## Contrôle des surfaces planes

La surface étalon peut être le **marbre** ou la **règle**.

### 1° Contrôle des surfaces au marbre.

Les dimensions des pièces à vérifier doivent être inférieures à celles du marbre.

Le contrôle a pour objet de comparer la surface de la pièce avec la face plane du marbre.

#### a) *Première méthode.*

On met en contact le marbre et la pièce, avec interposition d'un enduit gras coloré : ce procédé ne permet pas de chiffrer les défauts mais seulement de les localiser. On compte le nombre de points de contact au centimètre carré : 5 surfaces de portées au cm² indiquent une excellente exécution.

#### b) *Seconde méthode.*

Elle est fondée sur le théorème de géométrie suivant :

*Deux plans parallèles sont équidistants.*

On imagine un plan fictif parallèle au plan du marbre et passant par trois points de la surface à contrôler, aussi éloignés que possible les uns des autres ; la position des différents points de la surface est repérée par rapport à ce plan fictif.

La pièce repose sur trois vérins correspondant aux points A, B et C de la surface à vérifier (*fig.* 13). A l'aide d'un comparateur et en agissant successivement sur les vérins B et C, on dispose les trois points à égale distance du marbre (comparateur à zéro). A l'aide du comparateur, on mesure les distances existant entre les différents points de la pièce et le plan fictif passant par A, B et C.

Si l'on a pris soin de tracer un quadrillé sur la pièce, on peut systématiquement relever les erreurs et les noter sur un dessin. Ainsi se trouve tracée la carte de la surface avec ses lignes de niveau. Ces renseignements sont particulièrement utiles à l'organisation des opérations de finition.

Remarques.

1. Si l'on veut contrôler le parallélisme de deux faces planes d'une pièce, il suffit de faire reposer une face directement sur le marbre et d'utiliser un comparateur pour mesurer les erreurs. Pour réaliser cette opération, il est possible de déplacer la pièce en laissant le comparateur fixe, ou inversement.

2. La précision de la mesure dépend évidemment de celle du marbre. On conçoit combien il est important d'utiliser des marbres de qualité et de les conserver en parfait état.

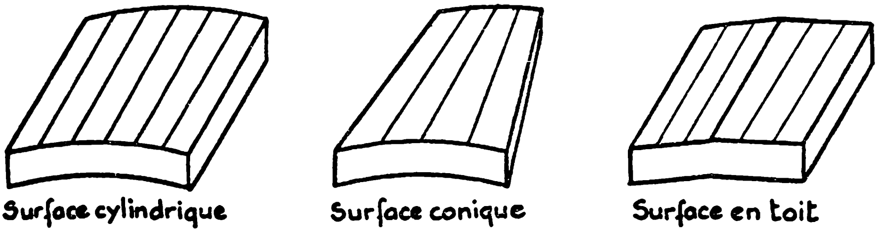



*Fig.* **14. — Formes possibles d'une surface plane usinée dans de mauvaises conditions.**

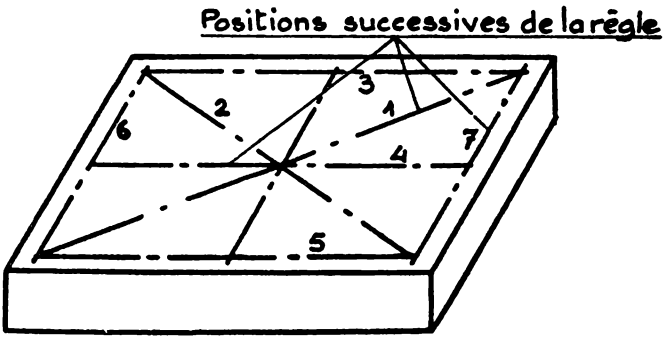



*Fig.* **15. — Positions successives de la règle permettant le contrôle d'un plan.**

## 2° Contrôle des surfaces à la règle.

Ce contrôle est utilisé surtout pour les pièces de grande dimension.

Il est fondé sur le théorème de géométrie suivant :

*Une droite qui a deux points communs avec un plan est tout entière contenue dans ce plan.*

### a) *Utilisation de règles permettant un contact linéaire.*

Ces règles (modèles 1, 2, 3 de la *figure* 12) comportent des arêtes rectilignes, intersection de deux surfaces planes.

Le contact de l'arête et du plan est contrôlé visuellement : un œil bien exercé apprécie la raie de lumière dont l'épaisseur correspond à un défaut de $\frac{1}{100}$ de mm.

Mais la surface que l'on souhaite obtenir plane par usinage peut se déformer, lorsqu'on la démonte de la table de la machine ; elle peut, toutefois, rester une surface réglée suivant une ou deux directions (forme cylindrique, conique, ou en toit, *fig.* 14) ; il est prudent d'effectuer le contrôle suivant trois directions disposées à 45° : côtés du rectangle et ses diagonales.

Les positions de la règle sont données sur la *figure* 15.

### b) *Utilisation de règles comportant une large surface plane.*

Modèles 3 et 4 (*fig.* 12) et règle en fonte évidée et nervurée.

**1° Contrôle direct.**

— La règle est posée sur la surface en contact et sollicitée à pivoter.

Lorsque cette surface présente un creux, la règle, sur laquelle on exerce un effort horizontal relativement faible, peut pivoter autour de chacune de ses extrémités.

Si la surface présente une bosse, la règle peut pivoter sur la partie bombée.

Quand la surface est plane, le pivotement devient difficile ; il peut être obtenu en n'importe quel point de la règle..

— La règle est posée sur la surface enduite d'une très mince couche colorée lubrifiante : un mouvement alternatif de translation rectiligne permet de mettre en évidence les points de contact. La surface de la règle est le plan étalon : elle joue le même rôle que le marbre. C'est ainsi que l'on vérifie les glissières étroites des machines.

**2° Contrôle indirect.**

Il est fondé sur la propriété des droites et plans parallèles : *une droite et un plan parallèles sont équidistants.*

On mesure les défauts de planitude d'une surface en relevant les écarts de parallélisme de cette surface avec une règle, étalon rectiligne.

Le contrôle peut être fait en utilisant uniquement des cales (*fig.* 16) ou un comparateur que l'on déplace le long de la pièce (*fig.* 17).

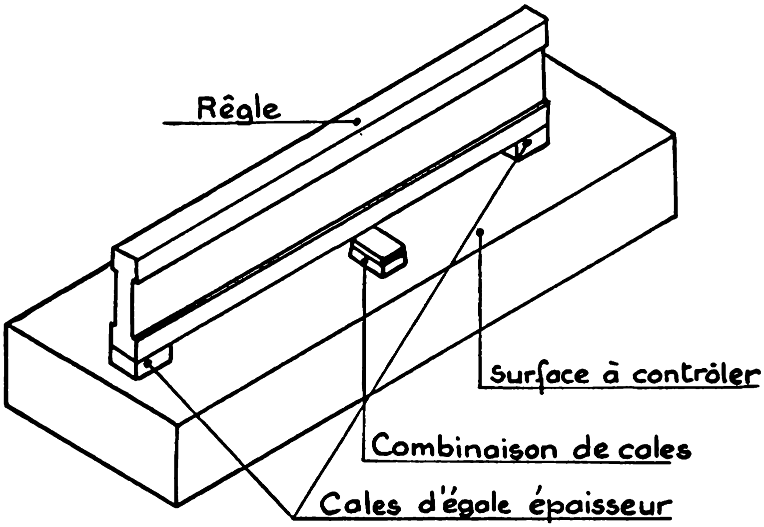



*Fig.* 16. — Contrôle d'un plan de grande dimension au moyen de cales étalons.

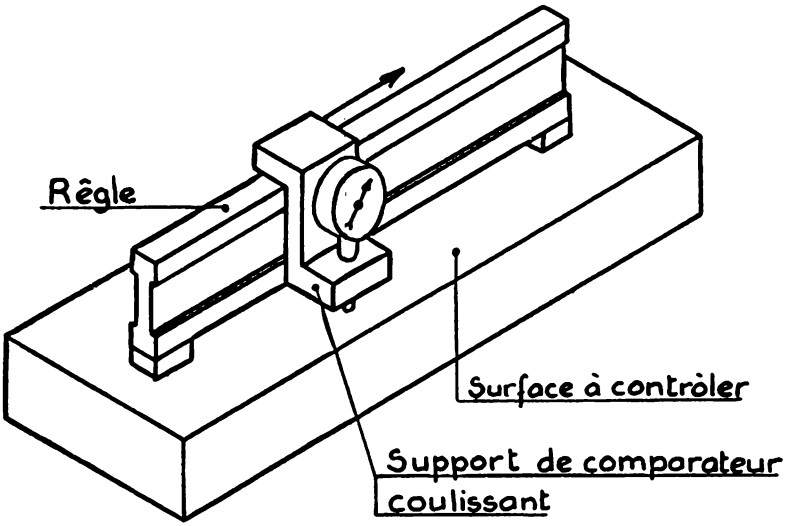



*Fig.* 17. — Contrôle d'un plan à l'aide d'une règle et d'un comparateur.

Il est bien évident que ce contrôle ne peut être effectif que si la règle est disposée successivement suivant les diagonales et parallèlement aux côtés de la surface à vérifier, supposée rectangulaire.

# Contrôle et mesure simple des angles

En construction mécanique, on est appelé à contrôler :

*a*) **La position relative de surfaces planes.**

Deux surfaces planes formant un **dièdre,** on doit mesurer l'angle de ce dièdre.

On appelle angle d'un dièdre, l'angle formé par les droites d'intersection des plans constituant ce dièdre avec un plan perpendiculaire à leur intersection (*fig.* 1).

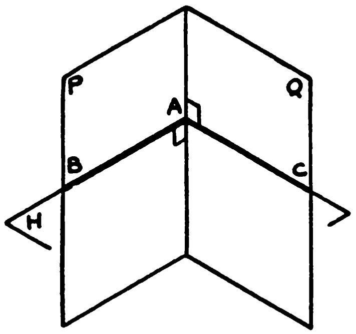



***Fig.* 1. — Angle d'un dièdre.**

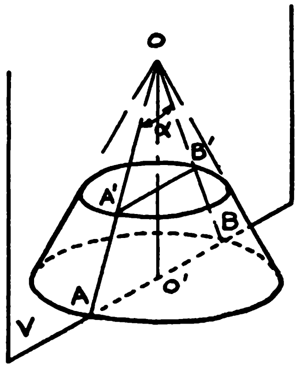



***Fig.* 2. — Angle au sommet d'un cône.**

*b*) **L'angle au sommet de surfaces coniques.**

Cet angle est celui de deux génératrices opposées, obtenues en coupant le cône par un plan contenant l'axe (*fig.* 2).

## Principe du contrôle

Comme pour tous les contrôles, on peut opérer :

— **par comparaison,** à l'aide d'un étalon réalisé avec une grande précision ;

— **par mesure directe,** en utilisant des appareils de mesure à lecture directe.

# CONTRÔLE DES ANGLES DES DIÈDRES

On utilise des étalons dont la surface extérieure est constituée par deux surfaces planes formant un dièdre dont l'angle a la valeur indiquée avec une grande précision.

Les angles qui doivent être le plus souvent contrôlés ont pour valeur : 90° — 60° — 120° — 45° — 135°.

## A. — Contrôle de l'angle droit

### 1° Étude des étalons à 90°.

a) ***Les équerres*** sont les étalons les plus utilisés.

Les équerres d'épaisseur constante, réalisées à partir d'ébauches d'acier forgé, sont usinées grossièrement, cémentées et ensuite terminées par rectification (*fig.* 3). Appliquées sur la pièce à contrôler, elles permettent l'appréciation à l'œil, devant la « boîte à lumière », de la différence de leur angle avec celui de la pièce. Un œil bien exercé peut ainsi apprécier un angle correspondant à un écart de 1 ou 2/100 de mm d'ouverture. Pour une longueur de branche de 100 mm, cet écart représente un angle de :

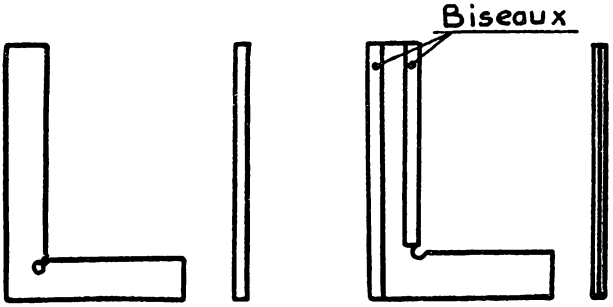



*Fig.* 3. — **Équerre ordinaire.**

$$\frac{0{,}01}{100} \times \frac{180}{\pi} = 0^{\circ}{,}0057$$

$$\text{ou} \quad \frac{0{,}01}{100} \times \frac{180}{\pi} \times 3600 = 20''.$$

Les équerres à talon, réalisées avec le même soin, sont mieux adaptées à un contrôle précis ; reposant sur leur talon, elles peuvent occuper une position stable sur un marbre (*fig.* 4).

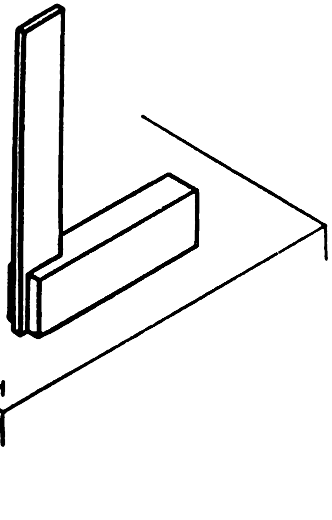



*Fig.* 4. — **Équerre à talon.** ⟶

b) ***Les prismes*** ayant deux faces planes, rigoureusement perpendiculaires, remplacent avantageusement les équerres à talon. On les utilise concurremment avec des cylindres d'équerrage, plus faciles à usiner que les prismes, mais d'un emploi moins aisé. Un cylindre d'équerrage est rigoureusement cylindrique et sa face d'extrémité, constituée par une couronne circulaire plane, est perpendiculaire à son axe (*fig.* 5).

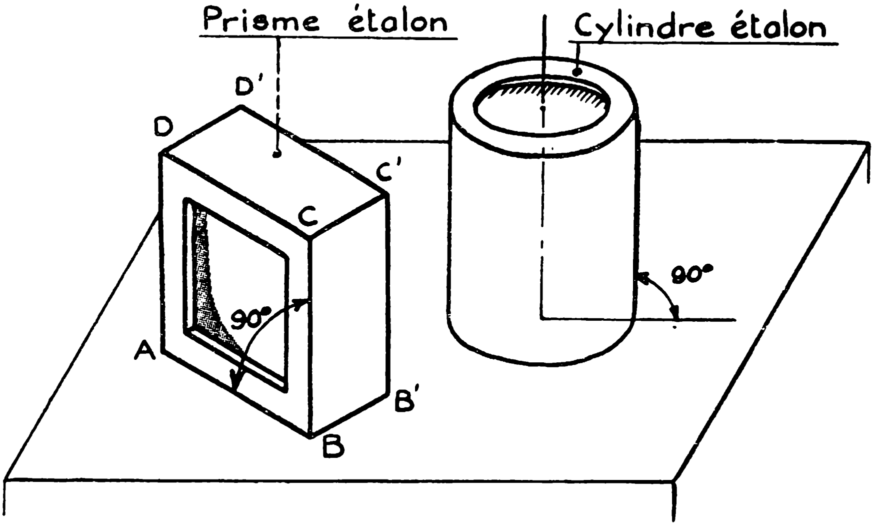



*Fig.* 5. — **Prisme et cylindre étalons.**

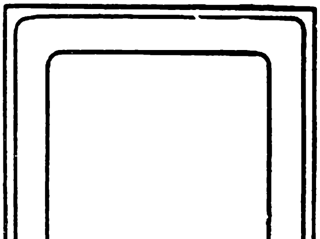


*Fig.* 6. — **Mauvaise conception d'un cadre étalon.**

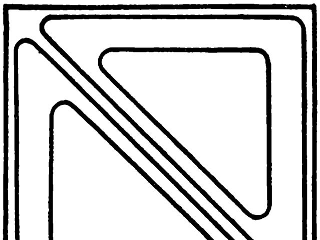


*Fig.* 7. — **Cadre étalon indéformable.**

Le véritable étalon à 90° est donc le prisme massif, car il est pratiquement indéformable. Si, pour le rendre moins lourd, on utilise un étalon ajouré, il convient d'éviter la forme en cadre (*fig.* 6). Un étalon qui est usiné risque de se déformer suivant un parallélogramme, lorsqu'il est soumis à des chocs ou à des efforts anormaux. La forme idéale pour étalon léger est le cadre avec contreventement en diagonale (*fig.* 7).

## c) *Contrôle des étalons en cours d'usinage.*

**Première méthode.**

On exécute trois étalons. On s'assure, avec une précision suffisante, que les faces du dièdre dont on veut vérifier l'angle sont bien planes. On rectifie successivement une face de chaque étalon, jusqu'à ce que les dièdres, étant disposés dos à dos, indifféremment, le contact se fasse partout parfaitement (*voir fig.* 8).

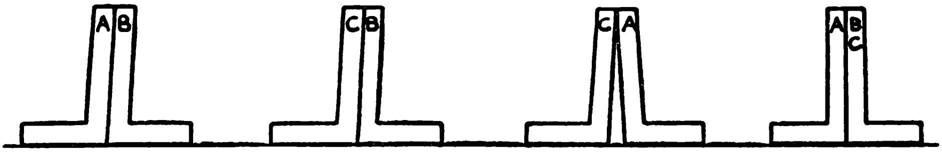



*Fig.* 8. — **Principe du contrôle des équerres, exécuté par groupe de trois.**

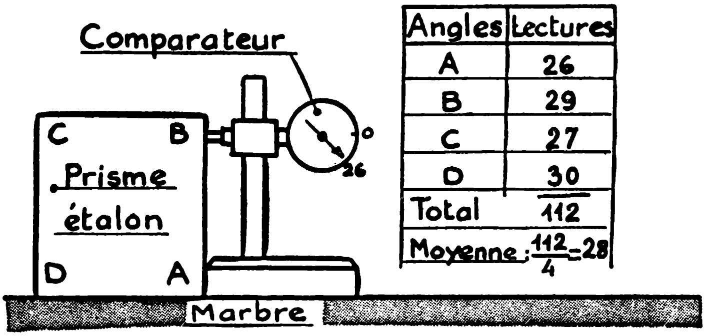



*Fig.* 9. — **Contrôle d'un prisme étalon au comparateur.**

**Deuxième méthode.**

Elle est justifiée par la propriété des quadrilatères dont la somme des angles intérieurs est égale à 4 droits.

On réalise un étalon prismatique avec le maximum de soin : faces parfaitement planes et sensiblement parallèles. On présente successivement les quatre faces devant un comparateur disposé comme l'indique la *figure* 9. La moyenne arithmétique des lectures enregistrées sur le comparateur représente l'indication qui correspondrait à un angle droit.

On peut ainsi, sur un prisme étalon, réaliser les retouches avec méthode et précision, puisque l'on peut situer les défauts et connaître leur importance. Mais on peut aussi admettre que la moyenne arithmétique des indications du comparateur correspond avec exactitude à l'angle droit et substituer à l'étalon le comparateur et son support. Cela évite un usinage long et difficile de l'étalon prismatique.

d) ***Précision des étalons.***

Si l'on indique par L la longueur de la plus grande branche de l'équerre ou de la plus grande face de l'étalon prismatique, l'erreur maximum admise, relevée au comparateur, est donnée par les relations suivantes :

— **Étalon de haute précision.**

Erreur en microns : $e = \pm \left(2 + \frac{L}{100}\right)$.

L étant exprimée en mm.

Pour L = 200, $e = \pm$ 4 microns,

soit environ $\widehat{\alpha} = \pm\ 2'',7$.

— **Étalon précision contrôle.**

$$e = \pm \left(5 + \frac{L}{50}\right).$$

Pour L = 200, $e = \pm$ 9 microns, soit $\widehat{\alpha} = 6''$.

— **Étalon d'atelier courant.**

$$e = \pm \left(10 + \frac{L}{20}\right).$$

Pour L = 200, $e$ = 20 microns, soit $\widehat{\alpha} = 13''$.

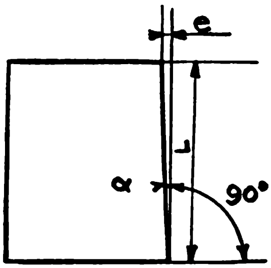



***Fig.* 10. — Caractéristiques des erreurs d'équerrage.**

Il est bien évident que les étalons doivent avoir un état de surface très soigné et une dureté aussi grande que possible (acier traité, fonte dure). Le métal qui a servi à leur exécution doit être stabilisé.

## 2° Utilisation des étalons à 90°.

Les étalons peuvent être utilisés pour assurer un contrôle visuel. Ils sont alors appliqués sur le dièdre à vérifier.

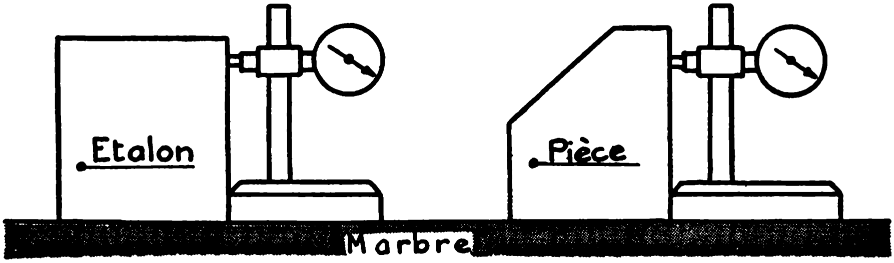



***Fig.* 11 — Principe de l'utilisation des étalons à 90°.**

Le plus souvent, ils servent à mesurer les erreurs réalisées au cours de l'usinage. Ils sont utilisés pour le réglage d'un comparateur monté sur un support et posé sur un marbre (*fig.* 11).

La pièce étant substituée à l'étalon, on peut ainsi mesurer les différences de position existant entre une surface de référence de l'étalon et l'une des faces usinées du dièdre à contrôler.

## B. — Contrôle des angles à 60, 120 et 135°

La méthode repose sur la propriété géométrique des polygones à *n* côtés, dont la somme des angles intérieurs est S = 2 (*n* — 2) droits.

Soit 2 droits pour le triangle et 8 droits pour l'hexagone.

Les étalons à 60, 120 et 135° sont des prismes massifs dont la base est un triangle équilatéral, un hexagone ou un octogone, exécutés avec le maximum de soin, surtout en ce qui concerne la planitude des faces. Les faces des prismes sont sensiblement perpendiculaires au plan de base. Une équerre à comparateur permet d'enregistrer les différences de position des faces du prisme correspondant à chaque angle intérieur du polygone de base (*fig.* 12 et 13).

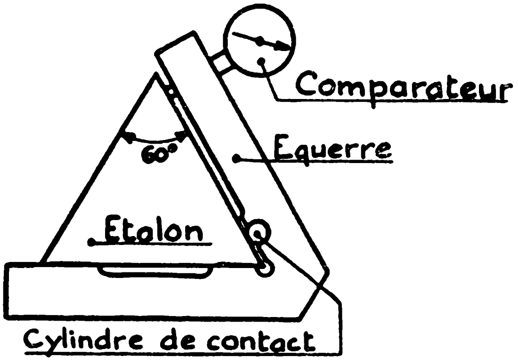



*Fig.* 12. — Contrôle des prismes étalons pour angle de 60°.

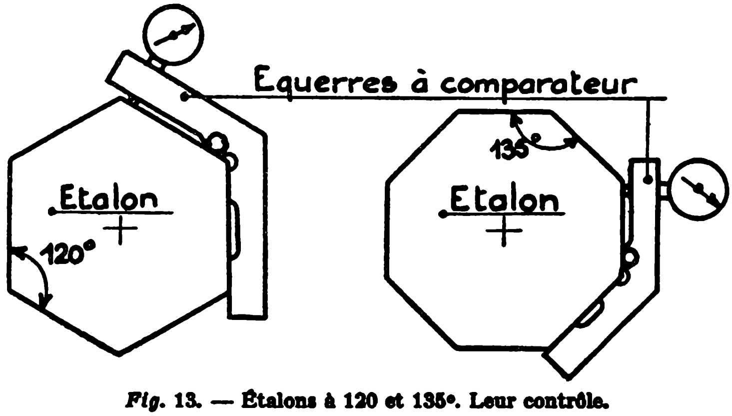



*Fig.* 13. — Étalons à 120 et 135°. Leur contrôle.

En faisant la moyenne arithmétique des valeurs trouvées (3 pour le prisme triangulaire, 6 pour le prisme hexagonal, 8 pour le prisme octogonal), on trouve la graduation qui correspond à l'angle exact de 60, 120 ou 135°.

L'équerre à comparateur ainsi réglée permet de contrôler l'usinage de finition du prisme étalon. Elle peut aussi être utilisée directement sur les pièces usinées.

## C. — Contrôle des angles à 45°

Le prisme étalon est un prisme droit ayant pour base un triangle rectangle isocèle (*fig.* 14). On s'est assuré que l'angle du dièdre droit est bien égal à 90°.

L'équerre à comparateur permet de constater l'égalité des angles adjacents à l'hypoténuse ($\widehat{B} = \widehat{C} = 45°$).

La moyenne arithmétique des deux valeurs trouvées représente l'étalonnage de l'équerre à combinaison.

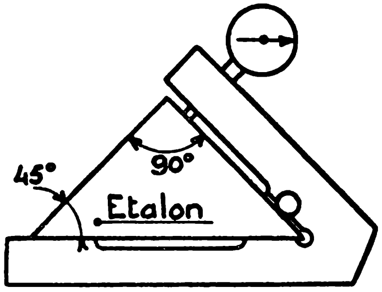



***Fig.* 14. — Contrôle des prismes étalons pour angle de 45°.**

## D. — Vérification des angles par mesure directe

On utilise des équerres réglables à rapporteur d'angle avec vernier permettant d'apprécier des fractions de degré : $\frac{1}{12}$ ou même $\frac{1}{60}$.

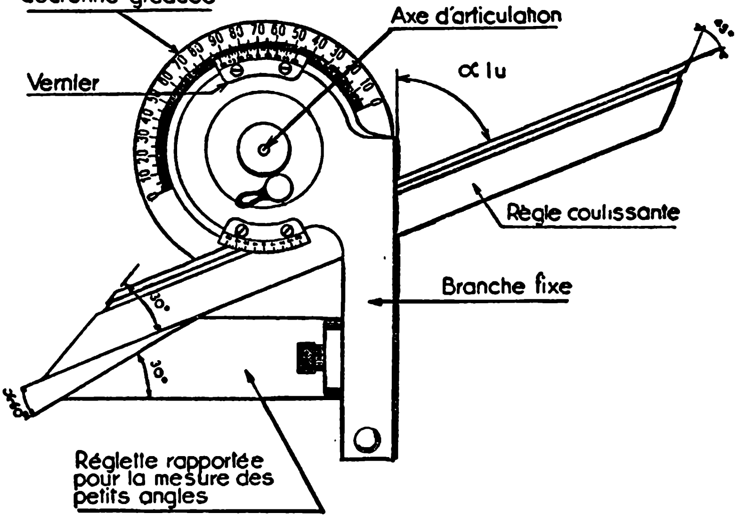



***Fig.* 15. — Rapporteur d'angle avec vernier à $\frac{1}{12}$ de degré.**

La *figure* 15 représente un rapporteur de précision qui rend possible, grâce à un vernier, la mesure des angles à $\frac{1}{12}$ de degré près, soit à 5′ près. La réglette coulissante, solidaire de la couronne graduée, tourne autour de l'axe d'articulation. L'adjonction, sur la branche fixe, de la réglette rapportée permet la mesure des petits angles avec plus de facilité.

# VÉRIFICATION APPROXIMATIVE DES CÔNES

On utilise des étalons tampons et bagues coniques (*fig.* 16). Le contrôle se fait d'abord par un essai de déplacement transversal de l'étalon mis en contact avec la pièce usinée : lorsque le déplacement constaté est nul aux deux extrémités du cône, on en conclut que le contact de l'étalon et de la pièce s'étend sur une partie importante des surfaces assemblées.

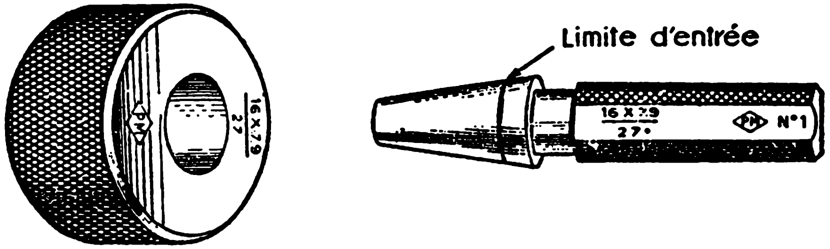



*Fig.* 16. — Bague et tampon coniques.

On contrôle ensuite la qualité et la position des surfaces en contact. A cet effet, la surface du calibre ou de la pièce est recouverte d'une légère couche d'enduit coloré ; en provoquant un mouvement de rotation de l'étalon par rapport à la pièce, on met en évidence les points de contact. Enfin, on contrôle le diamètre de référence du cône en mesurant la position d'enfoncement du calibre. Pour les faibles conicités, on peut effectuer cette mesure de position au réglet gradué.

Pour une conicité de 5 %, une réduction de diamètre de 0,05 mm correspond à un enfoncement de 1 mm du tampon ou de la bague.

SYMBOLES DES MÉTALLOÏDES ET MÉTAUX USUELS

| *Métalloïdes* | | *Métaux* | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Oxygène | O | Potassium | K | Nickel | Ni |
| Soufre | S | Sodium | Na | Cobalt | Co |
| Azote | N | Calcium | Ca | Molybdène | Mo |
| Phosphore | P | Magnésium | Mg | Tungstène | W ou Tu |
| Antimoine | Sb | Aluminium | Al | Vanadium | Va |
| Carbone | C | Manganèse | Mn | Étain | Sn |
| Silicium | Si | Zinc | Zn | Plomb | Pb |
| | | Cadmium | Cd | Hydrogène | H |
| | | Chrome | Cr | Cuivre | Cu |
| | | Fer | Fe | Argent | Ag |

| *Degrés à gauche* | **SINUS (de 0° à 45°)** | | | | | | *Minutes en haut* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0′ | 10′ | 20′ | 30′ | 40′ | 50′ | 60′ | |
| 0 | 0,000 0 | 0,002 9 | 0,005 8 | 0,008 7 | 0,011 6 | 0,014 5 | 0,017 5 | 89 |
| 1 | 0,017 5 | 0,020 4 | 0,023 3 | 0,026 2 | 0,029 1 | 0,032 0 | 0,034 9 | 88 |
| 2 | 0,034 9 | 0,037 8 | 0,040 7 | 0,043 6 | 0,046 5 | 0,049 4 | 0,052 3 | 87 |
| 3 | 0,052 3 | 0,055 2 | 0,058 1 | 0,061 1 | 0,064 0 | 0,066 9 | 0,069 8 | 86 |
| 4 | 0,069 8 | 0,072 7 | 0,075 6 | 0,078 5 | 0,081 4 | 0,084 3 | 0,087 2 | 85 |
| 5 | 0,087 2 | 0,090 1 | 0,093 0 | 0,095 9 | 0,098 7 | 0,101 6 | 0,104 5 | 84 |
| 6 | 0,104 5 | 0,107 4 | 0,110 3 | 0,113 2 | 0,116 1 | 0,119 0 | 0,121 9 | 83 |
| 7 | 0,121 9 | 0,124 8 | 0,127 6 | 0,130 5 | 0,133 4 | 0,136 3 | 0,139 2 | 82 |
| 8 | 0,139 2 | 0,142 1 | 0,144 9 | 0,147 8 | 0,150 7 | 0,153 6 | 0,156 4 | 81 |
| 9 | 0,156 4 | 0,159 3 | 0,162 2 | 0,165 1 | 0,167 9 | 0,170 8 | 0,173 7 | 80 |
| 10 | 0,173 7 | 0,176 5 | 0,179 4 | 0,182 2 | 0,185 1 | 0,188 0 | 0,190 8 | 79 |
| 11 | 0,190 8 | 0,193 7 | 0,196 5 | 0,199 4 | 0,202 2 | 0,205 1 | 0,207 9 | 78 |
| 12 | 0,207 9 | 0,210 8 | 0,213 6 | 0,216 4 | 0,219 3 | 0,222 1 | 0,225 0 | 77 |
| 13 | 0,225 0 | 0,227 8 | 0,230 6 | 0,233 5 | 0,236 3 | 0,239 1 | 0,241 9 | 76 |
| 14 | 0,241 9 | 0,244 7 | 0,247 6 | 0,250 4 | 0,253 2 | 0,256 0 | 0,258 8 | 75 |
| 15 | 0,258 8 | 0,261 6 | 0,264 4 | 0,267 2 | 0,270 0 | 0,272 8 | 0,275 6 | 74 |
| 16 | 0,275 6 | 0,278 4 | 0,281 2 | 0,284 0 | 0,286 8 | 0,289 6 | 0,292 4 | 73 |
| 17 | 0,292 4 | 0,295 2 | 0,297 9 | 0,300 7 | 0,303 5 | 0,306 3 | 0,309 0 | 72 |
| 18 | 0,309 0 | 0,311 8 | 0,314 5 | 0,317 3 | 0,320 1 | 0,322 8 | 0,325 6 | 71 |
| 19 | 0,325 6 | 0,328 3 | 0,331 1 | 0,333 8 | 0,336 6 | 0,339 3 | 0,342 0 | 70 |
| 20 | 0,342 0 | 0,344 8 | 0,347 5 | 0,350 2 | 0,352 9 | 0,355 7 | 0,358 4 | 69 |
| 21 | 0,358 4 | 0,361 1 | 0,363 8 | 0,366 5 | 0,369 2 | 0,371 9 | 0,374 6 | 68 |
| 22 | 0,374 6 | 0,377 3 | 0,380 0 | 0,382 7 | 0,385 4 | 0,388 1 | 0,390 7 | 67 |
| 23 | 0,390 7 | 0,393 4 | 0,396 1 | 0,398 8 | 0,401 4 | 0,404 1 | 0,406 7 | 66 |
| 24 | 0,406 7 | 0,409 4 | 0,412 0 | 0,414 7 | 0,417 3 | 0,420 0 | 0,422 6 | 65 |
| 25 | 0,422 6 | 0,425 3 | 0,427 9 | 0,430 5 | 0,433 1 | 0,435 8 | 0,438 4 | 64 |
| 26 | 0,438 4 | 0,441 0 | 0,443 6 | 0,446 2 | 0,448 8 | 0,451 4 | 0,454 0 | 63 |
| 27 | 0,454 0 | 0,456 6 | 0,459 2 | 0,461 8 | 0,464 3 | 0,466 9 | 0,469 5 | 62 |
| 28 | 0,469 5 | 0,472 0 | 0,474 6 | 0,477 2 | 0,479 7 | 0,482 3 | 0,484 8 | 61 |
| 29 | 0,484 8 | 0,487 4 | 0,489 9 | 0,492 4 | 0,495 0 | 0,497 5 | 0,500 0 | 60 |
| 30 | 0,500 0 | 0,502 5 | 0,505 0 | 0,507 5 | 0,510 0 | 0,512 5 | 0,515 0 | 59 |
| 31 | 0,515 0 | 0,517 5 | 0,520 0 | 0,522 5 | 0,525 0 | 0,527 5 | 0,529 9 | 58 |
| 32 | 0,529 9 | 0,532 4 | 0,534 8 | 0,537 3 | 0,539 8 | 0.542 2 | 0,544 6 | 57 |
| 33 | 0,544 6 | 0,547 1 | 0,549 5 | 0,551 9 | 0,554 4 | 0,556 8 | 0,559 2 | 56 |
| 34 | 0,559 2 | 0,561 6 | 0,564 0 | 0,566 4 | 0,568 8 | 0,571 2 | 0,573 6 | 55 |
| 35 | 0,573 6 | 0,576 0 | 0,578 3 | 0,580 7 | 0,583 1 | 0,585 4 | 0,587 8 | 54 |
| 36 | 0,587 8 | 0,590 1 | 0,592 5 | 0,594 8 | 0,597 2 | 0,599 5 | 0,601 8 | 53 |
| 37 | 0,601 8 | 0,604 1 | 0,606 5 | 0,608 8 | 0,611 1 | 0,613 4 | 0,615 7 | 52 |
| 38 | 0,615 7 | 0,618 0 | 0,620 2 | 0,622 5 | 0,624 8 | 0,627 1 | 0,629 3 | 51 |
| 39 | 0,629 3 | 0,631 6 | 0,633 8 | 0,636 1 | 0,638 3 | 0,640 6 | 0,642 8 | 50 |
| 40 | 0,642 8 | 0,645 0 | 0,647 2 | 0,649 5 | 0,651 7 | 0,653 9 | 0,656 1 | 49 |
| 41 | 0,656 1 | 0,658 3 | 0,660 4 | 0,662 6 | 0,664 8 | 0,667 0 | 0,669 1 | 48 |
| 42 | 0,669 1 | 0,671 3 | 0,673 4 | 0,675 6 | 0,677 7 | 0,679 9 | 0,682 0 | 47 |
| 43 | 0,682 0 | 0,684 1 | 0,686 2 | 0,688 4 | 0,690 5 | 0,692 6 | 0,694 7 | 46 |
| 44 | 0,694 7 | 0,696 8 | 0,698 8 | 0,700 9 | 0,703 0 | 0,705 1 | 0,707 1 | 45 |
| | 60′ | 50′ | 40′ | 30′ | 20′ | 10′ | 0′ | |
| *Minutes en bas* | **COSINUS (de 45° à 90°)** | | | | | | | *Degrés à droite* |

| *Degrés à gauche* | SINUS (de 45° à 90°) | | | | | | *Minutes en haut* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0′ | 10′ | 20′ | 30′ | 40 | 50′ | 60′ | |
| 45 | 0,707 1 | 0,709 2 | 0,711 2 | 0,713 2 | 0,715 3 | 0,717 3 | 0,719 3 | 44 |
| 46 | 0,719 3 | 0,721 4 | 0,723 4 | 0,725 4 | 0,727 4 | 0,729 4 | 0,731 3 | 43 |
| 47 | 0,731 3 | 0,733 3 | 0,735 3 | 0,737 3 | 0,739 2 | 0,741 2 | 0,743 1 | 42 |
| 48 | 0,743 1 | 0,745 1 | 0,747 0 | 0,749 0 | 0,750 9 | 0,752 8 | 0,754 7 | 41 |
| 49 | 0,754 7 | 0,756 6 | 0,758 5 | 0,760 4 | 0,762 3 | 0,764 2 | 0,766 0 | 40 |
| 50 | 0,766 0 | 0,767 9 | 0,769 8 | 0,771 6 | 0,773 5 | 0,775 3 | 0,777 1 | 39 |
| 51 | 0,777 1 | 0,779 0 | 0,780 8 | 0,782 6 | 0,784 4 | 0,786 2 | 0,788 0 | 38 |
| 52 | 0,788 0 | 0,789 8 | 0,791 6 | 0,793 3 | 0,795 1 | 0,796 9 | 0,798 6 | 37 |
| 53 | 0,798 6 | 0,800 4 | 0,802 1 | 0,803 9 | 0,805 6 | 0,807 3 | 0,809 0 | 36 |
| 54 | 0,809 0 | 0,810 7 | 0,812 4 | 0,814 1 | 0,815 8 | 0,817 5 | 0,819 1 | 35 |
| 55 | 0,819 1 | 0,820 8 | 0,822 5 | 0,824 1 | 0,825 8 | 0,827 4 | 0,829 0 | 34 |
| 56 | 0,829 0 | 0,830 7 | 0,832 3 | 0,833 9 | 0,835 5 | 0,837 1 | 0,838 7 | 33 |
| 57 | 0,838 7 | 0,840 3 | 0,841 8 | 0,843 4 | 0,845 0 | 0,846 5 | 0,848 1 | 32 |
| 58 | 0,848 1 | 0,849 6 | 0,851 1 | 0,852 6 | 0,854 2 | 0,855 7 | 0,857 2 | 31 |
| 59 | 0,857 2 | 0,858 7 | 0,860 2 | 0,861 6 | 0,863 1 | 0,864 6 | 0,866 0 | 30 |
| 60 | 0,866 0 | 0,867 5 | 0,868 9 | 0,870 4 | 0,871 8 | 0,873 2 | 0,874 6 | 29 |
| 61 | 0,874 6 | 0,876 0 | 0,877 4 | 0,878 8 | 0,880 2 | 0,881 6 | 0,883 0 | 28 |
| 62 | 0,883 0 | 0,884 3 | 0,885 7 | 0,887 0 | 0,888 4 | 0,889 7 | 0,891 0 | 27 |
| 63 | 0,891 0 | 0,892 3 | 0,893 6 | 0,894 9 | 0,896 2 | 0,897 5 | 0,898 8 | 26 |
| 64 | 0,898 8 | 0,900 1 | 0,901 3 | 0,902 6 | 0,903 8 | 0,905 1 | 0,906 3 | 25 |
| 65 | 0,906 3 | 0,907 5 | 0,908 8 | 0,910 0 | 0,911 2 | 0,912 4 | 0,913 6 | 24 |
| 66 | 0,913 6 | 0,914 7 | 0,915 9 | 0,917 1 | 0,918 2 | 0,919 4 | 0,920 5 | 23 |
| 67 | 0,920 5 | 0,921 6 | 0,922 8 | 0,923 9 | 0,925 0 | 0,926 1 | 0,927 2 | 22 |
| 68 | 0,927 2 | 0,928 3 | 0,929 3 | 0,930 4 | 0,931 5 | 0,932 5 | 0,933 6 | 21 |
| 69 | 0,933 6 | 0,934 6 | 0,935 7 | 0,936 7 | 0,937 7 | 0,938 7 | 0,939 7 | 20 |
| 70 | 0,939 7 | 0,940 7 | 0,941 7 | 0,942 6 | 0,943 6 | 0,944 6 | 0,945 5 | 19 |
| 71 | 0,945 5 | 0,946 5 | 0,947 4 | 0,948 3 | 0,949 2 | 0,950 1 | 0,951 1 | 18 |
| 72 | 0,951 1 | 0,952 0 | 0,952 8 | 0,953 7 | 0,954 6 | 0,955 5 | 0,956 3 | 17 |
| 73 | 0,956 3 | 0,957 2 | 0,958 0 | 0,958 8 | 0,959 6 | 0,960 5 | 0,961 3 | 16 |
| 74 | 0,961 3 | 0,962 1 | 0,962 9 | 0,963 6 | 0,964 4 | 0,965 2 | 0,965 9 | 15 |
| 75 | 0,965 9 | 0,966 7 | 0,967 4 | 0,968 2 | 0,968 8 | 0,969 6 | 0,970 3 | 14 |
| 76 | 0,970 3 | 0,971 0 | 0,971 7 | 0,972 4 | 0,973 0 | 0,973 7 | 0,974 4 | 13 |
| 77 | 0,974 4 | 0,975 0 | 0,975 7 | 0,976 3 | 0,976 9 | 0,977 5 | 0,978 2 | 12 |
| 78 | 0,978 2 | 0,978 8 | 0,979 3 | 0,979 9 | 0,980 5 | 0,981 1 | 0,981 6 | 11 |
| 79 | 0,981 6 | 0,982 2 | 0,982 7 | 0,983 2 | 0,983 8 | 0,984 3 | 0,984 8 | 10 |
| 80 | 0,984 8 | 0,985 3 | 0,985 8 | 0,986 3 | 0,986 8 | 0,987 2 | 0,987 7 | 9 |
| 81 | 0,987 7 | 0,988 1 | 0,988 6 | 0,989 0 | 0,989 4 | 0,989 9 | 0,990 3 | 8 |
| 82 | 0,990 3 | 0,990 7 | 0,991 1 | 0,991 4 | 0,991 8 | 0,992 2 | 0,992 5 | 7 |
| 83 | 0,992 5 | 0,992 9 | 0,993 2 | 0,993 6 | 0,993 9 | 0,994 2 | 0,994 5 | 6 |
| 84 | 0,994 5 | 0,994 8 | 0,995 1 | 0,995 4 | 0,995 7 | 0,995 9 | 0,996 2 | 5 |
| 85 | 0,996 2 | 0,996 4 | 0,996 7 | 0,996 9 | 0,997 1 | 0,997 4 | 0,997 6 | 4 |
| 86 | 0,997 6 | 0,997 8 | 0,998 0 | 0,998 1 | 0,998 3 | 0,998 5 | 0,998 6 | 3 |
| 87 | 0,998 6 | 0,998 8 | 0,998 9 | 0,999 0 | 0,999 2 | 0,999 3 | 0,999 4 | 2 |
| 88 | 0,999 4 | 0,099 5 | 0,999 6 | 0,999 7 | 0,999 7 | 0,999 8 | 0,999 8 | 1 |
| 89 | 0,999 8 | 0,999 9 | 0,999 9 | 0,999 9 | 0,999 9 | 1,000 0 | 1,000 0 | 0 |
| | 60′ | 50′ | 40′ | 30′ | 20′ | 10′ | 0′ | |
| *Minutes en bas* | COSINUS (de 0° à 45°) | | | | | | *Degrés à droite* |

| *Degrés à gauche* | **TANGENTES (de 0° à 45°)** | | | | | | | *Minutes en haut* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0′ | 10′ | 20′ | 30′ | 40′ | 50′ | 60′ | |
| 0 | 0,000 0 | 0,002 9 | 0,005 8 | 0,008 7 | 0,011 6 | 0,014 5 | 0,017 5 | 89 |
| 1 | 0,017 5 | 0,020 4 | 0,023 3 | 0,026 2 | 0,029 1 | 0,032 0 | 0,034 9 | 88 |
| 2 | 0,034 9 | 0,037 8 | 0,040 7 | 0,043 7 | 0,046 6 | 0,049 5 | 0,052 4 | 87 |
| 3 | 0,052 4 | 0,055 3 | 0,058 2 | 0,061 2 | 0,064 1 | 0,067 0 | 0,069 9 | 86 |
| 4 | 0,069 9 | 0,072 9 | 0,075 8 | 0,078 7 | 0,081 6 | 0,084 6 | 0,087 5 | 85 |
| 5 | 0,087 5 | 0,0904 | 0,093 4 | 0,096 3 | 0,099 2 | 0,102 2 | 0,105 1 | 84 |
| 6 | 0,105 1 | 0,108 1 | 0,111 0 | 0,113 9 | 0,116 9 | 0,119 8 | 0,122 8 | 83 |
| 7 | 0,122 8 | 0,125 7 | 0,128 7 | 0,131 7 | 0,134 6 | 0,137 6 | 0,140 5 | 82 |
| 8 | 0,140 5 | 0,143 5 | 0,146 5 | 0,149 5 | 0,152 4 | 0,155 4 | 0,158 4 | 81 |
| 9 | 0,158 4 | 0,161 4 | 0,164 4 | 0,167 3 | 0,170 3 | 0,173 3 | 0,176 3 | 80 |
| 10 | 0,176 3 | 0,179 3 | 0,182 3 | 0,185 3 | 0,188 4 | 0,191 4 | 0,194 4 | 79 |
| 11 | 0,194 4 | 0,197 4 | 0,200 4 | 0,203 5 | 0,206 5 | 0,209 5 | 0,212 6 | 78 |
| 12 | 0,212 6 | 0,215 6 | 0,218 6 | 0,221 7 | 0,224 8 | 0,227 8 | 0,230 9 | 77 |
| 13 | 0,230 9 | 0,233 9 | 0,237 0 | 0,240 1 | 0,243 2 | 0,246 2 | 0,249 3 | 76 |
| 14 | 0,249 3 | 0,252 4 | 0,255 5 | 0,258 6 | 0,261 7 | 0,264 8 | 0,268 0 | 75 |
| 15 | 0,268 0 | 0,271 1 | 0,274 2 | 0,277 3 | 0,280 5 | 0,283 6 | 0,286 8 | 74 |
| 16 | 0,286 8 | 0,289 9 | 0,293 1 | 0,296 2 | 0,299 4 | 0,302 7 | 0,305 7 | 73 |
| 17 | 0,305 7 | 0,308 9 | 0,312 1 | 0,315 3 | 0,318 5 | 0,321 7 | 0,324 9 | 72 |
| 18 | 0,324 9 | 0,328 1 | 0,331 4 | 0,334 6 | 0,337 8 | 0,341 1 | 0,344 3 | 71 |
| 19 | 0,344 3 | 0,347 6 | 0,350 8 | 0,354 1 | 0,357 4 | 0,360 7 | 0,364 0 | 70 |
| 20 | 0,364 0 | 0,367 3 | 0,370 6 | 0,373 9 | 0,377 2 | 0,380 5 | 0,383 9 | 69 |
| 21 | 0,383 9 | 0,387 2 | 0,390 6 | 0,393 9 | 0,397 3 | 0,400 7 | 0,404 0 | 68 |
| 22 | 0,404 0 | 0,407 4 | 0,410 8 | 0,414 2 | 0,417 6 | 0,421 1 | 0,424 5 | 67 |
| 23 | 0,424 5 | 0,427 9 | 0,431 4 | 0,434 8 | 0,438 3 | 0,441 8 | 0,445 2 | 66 |
| 24 | 0,445 2 | 0,448 7 | 0,452 2 | 0,455 7 | 0,459 2 | 0,462 8 | 0,466 3 | 65 |
| 25 | 0,466 3 | 0,469 9 | 0,473 4 | 0,477 0 | 0,480 6 | 0,484 1 | 0,487 7 | 64 |
| 26 | 0,487 7 | 0,491 3 | 0,495 0 | 0,498 6 | 0,502 2 | 0,505 9 | 0,509 5 | 63 |
| 27 | 0,509 5 | 0,513 2 | 0,516 9 | 0,520 6 | 0,524 3 | 0,528 0 | 0,531 7 | 62 |
| 28 | 0,531 7 | 0,535 5 | 0,539 2 | 0,543 0 | 0,546 7 | 0,550 5 | 0,554 3 | 61 |
| 29 | 0,554 3 | 0,558 1 | 0,561 9 | 0,565 8 | 0,569 6 | 0,573 5 | 0,577 4 | 60 |
| 30 | 0,577 4 | 0,581 2 | 0,585 1 | 0,589 1 | 0,593 0 | 0,596 9 | 0,600 9 | 59 |
| 31 | 0,600 9 | 0,604 8 | 0,608 8 | 0,612 8 | 0,616 8 | 0,620 8 | 0,624 9 | 58 |
| 32 | 0,624 9 | 0,628 9 | 0,633 0 | 0,637 1 | 0,641 2 | 0,645 3 | 0,649 4 | 57 |
| 33 | 0,649 4 | 0,653 6 | 0,657 7 | 0,661 9 | 0,666 1 | 0,670 3 | 0,674 5 | 56 |
| 34 | 0,674 5 | 0,678 8 | 0,683 0 | 0,687 3 | 0,691 6 | 0,695 9 | 0,700 2 | 55 |
| 35 | 0,700 2 | 0,704 6 | 0,708 9 | 0,713 3 | 0,717 7 | 0,722 1 | 0,726 5 | 54 |
| 36 | 0,726 5 | 0,731 0 | 0,735 5 | 0,740 0 | 0,744 5 | 0,749 0 | 0,753 6 | 53 |
| 37 | 0,753 6 | 0,758 1 | 0,762 7 | 0,767 3 | 0,772 0 | 0,776 6 | 0,781 3 | 52 |
| 38 | 0,781 3 | 0,786 0 | 0,790 7 | 0,795 4 | 0,800 2 | 0,805 0 | 0,809 8 | 51 |
| 39 | 0,809 0 | 0,814 6 | 0,819 5 | 0,824 3 | 0,829 2 | 0,834 2 | 0,83 91 | 50 |
| 40 | 0,839 1 | 0,844 1 | 0,849 1 | 0,854 1 | 0,859 1 | 0,864 2 | 0,869 3 | 49 |
| 41 | 0,869 3 | 0,874 4 | 0,879 6 | 0,884 7 | 0,889 9 | 0,895 2 | 0,900 4 | 48 |
| 42 | 0,900 4 | 0,905 7 | 0,911 0 | 0,916 3 | 0,921 7 | 0,927 1 | 0,932 5 | 47 |
| 43 | 0,932 5 | 0,938 0 | 0,943 5 | 0,949 0 | 0,954 5 | 0,960 1 | 0,965 7 | 46 |
| 44 | 0,965 7 | 0,971 3 | 0,977 0 | 0,982 7 | 0,988 4 | 0,994 2 | 1,000 0 | 45 |
| | 60′ | 50′ | 40′ | 30′ | 20′ | 10′ | 0′ | |
| *Minutes en bas* | **COTANGENTES (de 45° à 90°)** | | | | | | | *Degrés à droite* |

*Degrés à gauche* **TANGENTES (de 45° à 90°)** *Minutes en haut*

| | 0′ | 10′ | 20′ | 30′ | 40′ | 50′ | 60′ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 45 | 1,000 0 | 1,005 8 | 1,011 7 | 1,017 6 | 1,023 6 | 1,029 5 | 1,035 5 | 44 |
| 46 | 1,035 5 | 1,041 6 | 1,047 7 | 1,053 8 | 1,059 9 | 1,066 1 | 1,072 4 | 43 |
| 47 | 1,072 4 | 1,078 6 | 1,085 0 | 1,091 3 | 1,097 7 | 1,104 1 | 1,110 6 | 42 |
| 48 | 1,110 6 | 1,117 1 | 1,123 7 | 1,130 3 | 1,136 9 | 1,143 6 | 1,150 4 | 41 |
| 49 | 1,150 4 | 1,157 2 | 1,164 0 | 1,170 9 | 1,177 8 | 1,184 7 | 1,191 8 | 40 |
| 50 | 1,191 8 | 1,198 8 | 1,205 9 | 1,213 1 | 1,220 3 | 1,227 6 | 1,234 9 | 39 |
| 51 | 1,234 9 | 1,242 3 | 1,249 7 | 1,257 2 | 1,264 7 | 1,272 3 | 1,279 9 | 38 |
| 52 | 1,279 9 | 1,287 6 | 1,295 4 | 1,303 2 | 1,311 1 | 1,319 0 | 1,327 0 | 37 |
| 53 | 1,327 0 | 1,335 1 | 1,343 2 | 1,351 4 | 1,359 7 | 1,368 0 | 1,376 4 | 36 |
| 54 | 1,376 4 | 1,384 8 | 1,393 4 | 1,402 0 | 1,410 6 | 1,419 3 | 1,428 1 | 35 |
| 55 | 1,428 1 | 1,437 0 | 1,446 0 | 1,455 0 | 1,464 1 | 1,473 3 | 1,482 6 | 34 |
| 56 | 1,482 6 | 1,491 9 | 1,501 3 | 1,510 8 | 1,520 4 | 1,530 1 | 1,539 9 | 33 |
| 57 | 1,539 9 | 1,549 7 | 1,559 7 | 1,569 7 | 1,57 98 | 1,590 0 | 1,600 3 | 32 |
| 58 | 1,600 3 | 1,610 7 | 1,621 3 | 1,631 9 | 1,642 6 | 1,653 4 | 1,664 3 | 31 |
| 59 | 1,664 3 | 1,675 3 | 1,686 4 | 1,697 7 | 1,709 0 | 1,72 05 | 1,732 1 | 30 |
| 60 | 1,732 1 | 1,743 8 | 1,755 6 | 1,767 5 | 1,779 6 | 1,791 7 | 1,804 1 | 29 |
| 61 | 1,804 1 | 1,816 5 | 1,829 1 | 1,841 8 | 1,854 6 | 1,867 6 | 1,880 7 | 28 |
| 62 | 1,880 7 | 1,894 0 | 1,907 4 | 1,921 0 | 1,934 7 | 1,948 6 | 1,962 6 | 77 |
| 63 | 1,962 6 | 1,976 8 | 1,991 2 | 2,005 7 | 2,020 4 | 2,035 3 | 2,050 3 | 26 |
| 64 | 2,050 3 | 2,065 5 | 2,080 9 | 2,096 5 | 2,112 3 | 2,128 3 | 2,144 5 | 25 |
| 65 | 2,144 5 | 2,160 9 | 2,177 5 | 2,194 3 | 2,212 3 | 2,228 6 | 2,246 0 | 24 |
| 66 | 2,246 0 | 2,263 7 | 2,281 7 | 2,299 8 | 2,318 3 | 2,336 9 | 2,355 9 | 23 |
| 67 | 2,355 9 | 2,375 0 | 2,394 5 | 2,414 2 | 2,434 2 | 2,454 5 | 2,475 1 | 22 |
| 68 | 2,475 1 | 2,496 0 | 2,517 2 | 2,538 7 | 2,560 5 | 2,582 6 | 2,605 1 | 21 |
| 69 | 2,605 1 | 2,627 9 | 2,651 1 | 2,674 6 | 2,698 5 | 2,722 8 | 2,747 5 | 20 |
| 70 | 2,747 5 | 2,772 5 | 2,798 0 | 2,823 9 | 2,850 2 | 2,877 0 | 2,904 2 | 19 |
| 71 | 2,904 2 | 2,931 9 | 2,960 0 | 2,988 7 | 3,017 8 | 3,047 5 | 3,077 7 | 18 |
| 72 | 3,077 7 | 3,108 4 | 3,139 7 | 3,171 6 | 3,204 1 | 3,237 1 | 3,270 9 | 17 |
| 73 | 3,270 9 | 3,305 2 | 3,340 2 | 3,375 9 | 3,412 4 | 3,449 5 | 3,487 4 | 16 |
| 74 | 3,487 4 | 3,526 1 | 3,565 6 | 3,605 9 | 3,647 1 | 3,689 1 | 3,732 1 | 15 |
| 75 | 3,732 1 | 3,776 0 | 3,820 8 | 3,866 7 | 3,913 6 | 3,961 7 | 4,010 8 | 14 |
| 76 | 4,010 8 | 4,061 1 | 4,112 6 | 4,165 3 | 4,219 3 | 4,274 7 | 4,331 5 | 13 |
| 77 | 4,331 5 | 4,389 7 | 4,449 4 | 4,510 7 | 4,573 6 | 4,638 3 | 4,704 6 | 12 |
| 78 | 4,704 6 | 4,772 9 | 4,843 0 | 4,915 2 | 4,989 4 | 5,065 8 | 5,144 6 | 11 |
| 79 | 5,144 6 | 5,225 7 | 5,309 3 | 5,395 5 | 5,484 5 | 5,576 4 | 5,671 3 | 10 |
| 80 | 5,671 3 | 5;769 4 | 5,870 8 | 5,975 8 | 6,084 4 | 6,197 0 | 6,313 8 | 9 |
| 81 | 6,313 8 | 6,434 8 | 6,560 6 | 6,691 2 | 6,826 9 | 6,968 2 | 7,115 4 | 8 |
| 82 | 7,115 4 | 7,268 7 | 7,428 7 | 7,595 8 | 7,770 4 | 7,953 0 | 8,144 4 | 7 |
| 83 | 8,144 4 | 8,345 0 | 8,555 6 | 8,776 9 | 0,009 8 | 9,255 3 | 9,514 4 | 6 |
| 84 | 9,514 4 | 9,788 2 | 10,078 0 | 10,385 4 | 10,711 9 | 11,059 4 | 11,430 1 | 5 |
| 85 | 11,430 1 | 11,826 2 | 12,250 5 | 12,706 2 | 13,196 9 | 13,726 7 | 14,300 7 | 4 |
| 86 | 14,300 7 | 14,924 4 | 15,604 8 | 16,349 9 | 17,169 3 | 18,075 0 | 19,081 1 | 3 |
| 87 | 19,081 1 | 20,205 6 | 21,470 4 | 22,903 8 | 24,541 8 | 26,431 6 | 28,636 3 | 2 |
| 88 | 28,636 3 | 31,241 6 | 34,367 8 | 38,188 5 | 42,964 1 | 49,103 9 | 57,290 0 | 1 |
| 89 | 57,290 0 | 68,750 1 | 85,939 8 | 114,588 7 | 171,885 4 | 343,773 7 | | 0 |
| | 60′ | 50′ | 40′ | 30′ | 20′ | 10′ | 0′ | |

*Minutes en bas* **COTANGENTES (de 0° à 45°)** *Degrés à droite*

# TABLE DES MATIÈRES


Avant-propos ........ 3

ÉTUDE DES DIVERS PROCÉDÉS D'OBTENTION DES PIÈCES MÉTALLIQUES

- **La fonderie** ........ 7
  - Principe du moulage en sable ........ 7
  - Principales méthodes d'exécution des moules ........ 11
  - Machines à mouler ........ 26
  - Moulage en moules métalliques ........ 28
- **La forge** ........ 31
  - Chauffage du métal ........ 31
  - Engins de forgeage ........ 32
- **Le travail mécanique des métaux en feuilles : emboutissage** ........ 45
  - Généralités sur l'emboutissage ........ 46
  - Machines d'emboutissage ........ 50
  - Outils d'emboutissage ........ 53
  - Découpage et poinçonnage ........ 56
- **Différents procédés d'assemblage** ........ 63
  - L'agrafage ........ 64
  - Le rivetage ........ 65
  - Le soudage ........ 67
    - *Soudages autogènes* ........ 67
    - *Soudages hétérogènes* ........ 88
- **L'usinage** ........ 91
  - Génération des surfaces usinées ........ 91
  - Étude géométrique des outils ........ 94
  - L'affûtage des outils à arête tranchante normale ........ 104
  - Dimensions du copeau ........ 118
  - État des surfaces usinées ........ 118
  - Copeau taillé minimum ........ 121
- **Efforts résultant de la coupe du métal** ........ 123
  - Étude expérimentale ........ 123
  - Théorie de la formation du copeau ........ 128
  - Broutement des outils ........ 129
  - Étude de la trajectoire élastique des outils ........ 130
- **L'arrosage** ........ 133
  - Chaleur produite par la coupe du métal ........ 133
  - Conséquences résultant de ce dégagement de chaleur ........ 133
  - Nécessité de s'opposer à l'augmentation de température de l'outil et de la pièce ... 134
  - Les fluides utilisés ........ 135
  - Influence de l'arrosage sur la vitesse de coupe ........ 137
  - Influence de l'arrosage sur la pression de coupe ........ 137
  - Influence de l'arrosage sur l'état de surface ........ 138
  - Installations d'arrosage ........ 139
- **Alliages utilisés pour la fabrication des outils de coupe** ........ 143
  - Les aciers au carbone durs et extra-durs ........ 143
  - Les aciers à coupe rapide ........ 143
  - Les carbures métalliques ........ 144
  - Les céramiques ........ 145
  - Le diamant ........ 145

- **Le copeau gratté** .......... 147
  - Grattage à l'outil .......... 147
  - L'outil meule .......... 148
  - Le rodage .......... 163
  - La superfinition .......... 174

- **La vitesse de coupe** .......... 175
  - Applications .......... 175
  - Valeur de la vitesse de coupe .......... 177
  - Méthode de calcul mental des vitesses de coupe .......... 179

- **Principales machines-outils. Leur travail** .......... 187
  - Les machines à outil de coupe .......... 187
  - Les machines à outil abrasif .......... 188
    - *L'étau-limeur* .......... 189
    - *La machine à mortaiser* .......... 190
    - *La raboteuse* .......... 191
    - *Les machines à brocher* .......... 192
    - *Les tours* .......... 193
    - *Les machines à aléser* .......... 195
    - *Les machines à percer* .......... 196
    - *Les machines à fraiser* .......... 197
    - *Les machines à rectifier* .......... 198

- **Mise en position d'une pièce sur une machine-outil** .......... 200


MÉTROLOGIE INDUSTRIELLE


- **Notions sur l'interchangeabilité des pièces et sur le système international à limites** .......... 217
  - Considérations générales .......... 217
  - Système international à limites .......... 219
  - Étude des ajustements .......... 225
  - Appariement des pièces .......... 231

- **Cotation de fabrication** .......... 233

- **Métrologie des fabrications** .......... 235
  - Vérification des cotes des pièces exécutées ou en cours d'usinage .......... 235
  - Appareils de mesure directe .......... 236
  - Vérificateurs à tolérance .......... 246
  - Mesure des cotes par la méthode de comparaison .......... 250
  - Appareils de comparaison .......... 256

- **Vérification des surfaces** .......... 263
    - *Définition des surfaces usinées* .......... 263
    - *Propriétés géométriques des surfaces* .......... 264
    - *Méthodes générales de vérification des surfaces* .......... 265
  - Surface étalon plane .......... 266
    - *Contrôle des surfaces planes* .......... 271

- **Contrôle et mesure simple des angles** .......... 275
    - *Principe du contrôle* .......... 275
  - Contrôle des angles des dièdres .......... 276
  - Vérification approximative des cônes .......... 282



Les Éditions FOUCHER
128, rue de Rivoli
PARIS-1er
N° 4552-381

Imprimé en France

Imp. BUSSIÈRE
24, rue de Juranville
SAINT-AMAND (Cher)
446-III-1981

FOUCHER
le livre au
service du métier

198/A